

**Vergleichende Betrachtung  
des konduktiven Hochfrequenzschweißverfahrens  
und des Laserstrahlschweißverfahrens  
für die Herstellung von Tailored Blanks**



**TU Clausthal**

**Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor – Ingenieur**

**vorgelegt von  
Dipl.-Ök. Christian Haferkorn  
aus Hannover**

**genehmigt von der  
Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau  
der Technischen Universität Clausthal**

**Tag der mündlichen Prüfung:  
26. Oktober 2007**

*Die vorliegende Arbeit widme ich meinem Vater,  
Dr.-Ing. Gotthard Haferkorn († 2002) mit besonderem Dank.  
Sein väterliches Wohlwollen, sein stetes Fordern und Fördern,  
seine Liebe und Geduld haben mich geprägt, mir neue Wege geöffnet  
und meinen Lebensweg entscheidend beeinflusst.*

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand unter der Leitung und Betreuung von Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Wesling, Lehrstuhlinhaber und Institutsdirektor des Instituts für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren - ISAF - der Technischen Universität Clausthal.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Wesling sehr herzlich für die interessante Aufgabenstellung, die stete Betreuung und Unterstützung, die anregenden und Ziel führenden Gespräche sowie die Bereitstellung der erforderlichen Mittel für die Versuchsschweißungen und vergleichenden Untersuchungen.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr med. h.c. H. Haferkamp, dem ehemaligen Direktor des Instituts für Werkstoffkunde (IW) der Universität Hannover und Vorstandsmitglied des Laser Zentrum Hannover e. V. für die Unterstützung und Ermutigung sowie die persönlichen Ratschläge, die entscheidend zum Entstehen und Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

Hannover, im Oktober 2007

Christian Haferkorn

1	Einleitung.....	4
2	Zielsetzung .....	5
3	Die Entwicklung von Tailored Blanks .....	6
4	Stand von Wissenschaft und Technik .....	8
4.1	Konduktives Hochfrequenzschweißen von Platinen .....	8
4.1.1	Verfahrensbeschreibung und Prozessgrundlagen .....	9
4.1.1.1	Elektrodynamische Effekte (Skin- und Proximityeffekt) .....	9
4.1.2	Prozessparameter beim konduktiven Hochfrequenzschweißen .....	12
4.1.2.1	Generatorleistung und Schweißzeit .....	12
4.1.2.2	Stauchkraft .....	12
4.1.2.3	Auspannlänge und Spaltbreite .....	13
4.1.3	Hochfrequenzschweißbare Geometrien .....	14
4.1.4	Charakterisierung der Vorgänge in der Fügezone .....	16
4.1.5	Prozessintegrierte (in-situ) Vorwärmung und Wärmenachbehandlung .....	17
4.1.6	Vor- und Nachteile des Hf-Schweißprozesses .....	18
4.2	Laserstrahlschweißen von Platinen .....	19
4.3	Eingesetzte Laser .....	19
4.3.1	CO <sub>2</sub> -Laser .....	19
4.3.2	Festkörperlaser .....	21
4.3.3	Maschinenrahmen, Bearbeitungs- und Spannvorrichtung .....	23
4.3.4	Verfahrensbeschreibung und Prozessgrundlagen .....	24
4.3.4.1	Das Wärmeleitungsschweißen .....	24
4.3.4.2	Das Tiefschweißen .....	25
4.3.4.3	Tiefschweißen mit Zusatzwerkstoffen .....	26
4.3.5	Vor- und Nachteile des Laserschweißprozesses .....	26
4.4	Das Laser-Lichtbogen-Hybridschweißverfahren .....	27
4.4.1	Verfahrensbeschreibung und Prozessgrundlagen .....	27
4.4.2	Vor- und Nachteile des Laser-MSG-Hybridschweißprozesses .....	29
4.4.3	Nutzung weiterer hybrider Prozesse .....	30
4.4.4	Vorgänge in der Wärmeeinflusszone (WEZ) .....	30
5	Die Beeinflussung und Behandlung der Schweißnaht .....	33
5.1	Prozessintegrierte induktive Wärmebehandlung .....	34
6	Allgemeine Schweißbarkeit von Stählen .....	38
7	Umwandlungsverhalten der Stähle beim Schweißen .....	42
8	Eingesetzte Werkstoffe für die Herstellung von Tailored Blanks .....	45
9	Umformeigenschaften .....	47
10	Prüfverfahren und Qualitätssicherung .....	52
10.1	Zerstörungsfreie Prüfverfahren .....	52
10.1.1	Ultraschallprüfung .....	52
10.1.2	Elektronische Laser-Speckle Interferometrie .....	55
10.1.3	Metallografie mit Lichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop .....	57
10.2	Zerstörende Prüfverfahren .....	58
10.2.1	Zugprüfung mit quasistatischer Belastung .....	58
10.2.2	Zugprüfung mit dynamischer Belastung .....	58



10.2.3	Härtemessung.....	59
10.2.4	Erichsen-Prüfung .....	60
11	Oberflächenveredelung/Korrosionsschutz .....	62
11.1	Metallische Überzüge .....	62
11.2	Organische Beschichtungen .....	63
12	Anwendung und Verarbeitung von maßgeschneiderten Platinen.....	64
12.1	Vorteile durch den Einsatz von Tailored Blanks .....	65
13	Vergleich der Schweißverfahren.....	66
13.1	Faktoren für die Wahl des geeigneten Schweißverfahrens .....	66
13.1.1	Werkstoff.....	68
13.1.2	Vormaterial.....	69
13.1.3	Vorarbeit .....	70
13.1.4	Toleranzen .....	71
13.1.5	Geometrien .....	72
13.1.6	Schweißgeschwindigkeit .....	73
13.1.7	Verzug.....	74
13.1.8	Nacharbeit.....	75
13.1.9	Korrosionsschutz.....	76
13.2	Arbeitssicherheit und Schutzmaßnahmen.....	77
14	Durchführung der Schweißversuche und Prüfverfahren.....	79
14.1	Versuchswerkstoffe und Probengeometrie.....	79
14.2	Eingesetzte Anlagentechnik.....	80
14.2.1	Technische Daten der Laserstrahlschweißanlage .....	81
14.2.2	Prozessparameter des Laserschweißprozesses .....	82
14.2.3	Technische Daten der CHF-Schweißanlage.....	83
14.2.3.1	Prozessparameter des CHF-Schweißprozesses.....	83
14.3	Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften .....	86
14.3.1	Metallografische Untersuchungen .....	86
14.3.2	Härtemessungen.....	89
14.3.3	Statische Festigkeitsuntersuchungen .....	92
14.3.3.1	Ergebnisse aus dem Erichsen-Versuch .....	92
14.3.3.2	Ergebnisse aus dem Querzugversuch .....	93
14.4	Fazit aus den vergleichenden Untersuchungen .....	94
15	Vergleichsberechnungen .....	96
	(Laserschweißanlagen/CHF-Schweißanlage).....	96
16	Wirtschaftliche Betrachtung .....	101
17	Anwendungsbeispiele.....	103
18	Bedeutung für die Praxis .....	105
19	Zusammenfassung und Ausblick .....	107
20	Verzeichnis der Abbildungen .....	110
21	Tabellenverzeichnis .....	118
22	Literaturverzeichnis .....	120

## 1 Einleitung

Um erhöhten Anforderungen an den Leichtbau in der Verkehrstechnik mit steigenden Steifigkeiten und ständig wachsenden Ansprüchen an die Sicherheit zum einen und an die Kostenersparnis und den Umweltschutz zum anderen gerecht zu werden, werden in der Automobil- und -zulieferindustrie vermehrt maßgeschneiderte Platinen verschiedener Dicken und Güten (Tailored Blanks) als einbaufähige Komponente eingesetzt.

Moderne Kraftfahrzeuge bewirken durch die Entwicklung einer Vielzahl elektronischer Systeme und Sicherheitskomponenten steigende Gewichte. Dies macht sich negativ bemerkbar durch steigenden Kraftstoffverbrauch und daraus folgendem erhöhtem CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

Mit der Entwicklung von Tailored Blanks, Tailored Tubes und Tailored Components in unterschiedlichsten Materialien und Materialkombinationen (Tailored Hybrid Blanks) ließen sich erhebliche Gewichtseinsparungen bei der Verarbeitung in der Automobilkarosserie erzielen, was wiederum den Forderungen des Gesetzgebers nach Einhaltung strikter CO<sub>2</sub>-Emissionen Rechnung trug. Tailored Products ermöglichen die Verwendung des optimalen Stahls im Hinblick auf Dicke und Oberflächenveredelung an jeder beliebigen Stelle einer Karosserie. Die Konstrukteure werden dabei in die Lage versetzt, verschiedene Werkstoffe gezielt entsprechend den Bauteilbeanspruchungen anzupassen, sodass sich eine Verbesserung des Strukturverhaltens des fertigen Produkts ergibt. Die erfolgreiche Fertigung dieser besonderen Bauteile erfordert ständige Entwicklungen auf dem Sektor der Schweiß- und Fügeverfahren, bessere Variantenbeherrschung und Verkürzung der Prozessketten, um in dem Spannungsfeld Komplexität, Zeit, Flexibilität, Wirtschaftlichkeit und Qualität bestehen zu können. Von modernen Schweißanlagen wird ein prozesssicherer, wirtschaftlicher und wartungsarmer Ablauf erwartet; die geschweißten Platinen müssen eine hohe, dokumentierte Qualität aufweisen und Umformprozesse erlauben. Daher ist es unumgänglich, bestehende Produktionsstrukturen und -systeme ständig zu überdenken und weiterzuentwickeln. Die zunehmende Modularisierung der Fabrikstrukturen in der Automobilindustrie unterstützt die Fähigkeit, auf Veränderungen schnell und flexibel zu reagieren. Die Grundidee der Entwicklung von Tailored Blanks, kostengünstige und Gewicht einsparende Konstruktionen beanspruchsgerecht einsetzen zu können, führt in der Weiterentwicklung zu maßgeschneiderten Bauteilen (Tailored Products), die ausgehend von der erfolgreichen Verarbeitung in der Automobil- und Zuliefererindustrie in allen Bereichen der industriellen Produktion einsetzbar sind.

Auf dem Gebiet der Schweiß- und Fügeverfahren hat sich die moderne Laserstrahltechnik in den letzten Jahren in der Serienfertigung etabliert und beinhaltet weiterhin hohes Innovationspotential. Jedoch auch die in der Rohrherstellung bereits bewährte Hochfrequenzschweißtechnik bietet gerade auf dem Gebiet der Herstellung von maßgeschneiderten Platinen und ebenso komplexer Bauteilgeometrien (2D- und 3D-Konturennahte) als Fügeverfahren mit induktiver Energieeinkoppelung viel versprechende Möglichkeiten für den großindustriellen Einsatz, wie zahlreiche Untersuchungen in der Vergangenheit und jüngste Forschungsarbeiten belegen.

## 2 Zielsetzung

Nach DIN EN 14610 „Fügen durch Schweißen“ wird zwischen „Pressschweißen und „Schmelzschweißen“ unterschieden. Schmelzschweißen ist ein Fügevorgang bei örtlich begrenztem Schmelzfluss der Fügeteile und des Zusatzwerkstoffs ohne Anwendung einer Kraft. Das Pressschweißen erfolgt unter Anwendung einer Kraft mit oder ohne Erwärmung der Fügeteile [25].

Die Laserschweißtechnik als Schmelzschweißverfahren hat sich in den letzten Jahren in weiten Bereichen der Industrie durch einfache Automatisierung, hohe Flexibilität und Präzision insbesondere im Bereich der Herstellung von Blechhalbzeugen etabliert. Die Hochfrequenzschweißtechnik als Pressschweißverfahren dagegen findet vornehmlich Anwendung in der Herstellung von Rohren und ist in diesem Bereich als wirtschaftliches und schnelles Verfahren bekannt. In der Fertigung von Tailored Blanks kam die Hochfrequenzschweißtechnik mit konduktiver Energieübertragung im großindustriellen Bereich jedoch bisher nur vereinzelt zum Einsatz.

Ziel dieser Arbeit ist es, beide Fügeverfahren in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht umfassend zu untersuchen und zu beschreiben, mit dem Ziel, dem Anwender praktische Vergleichswerte als Hilfestellung bei der Wahl des geeigneten Schweißverfahrens zur Verfügung zu stellen. Anhand experimenteller Untersuchungen, die die spezifischen Eigenschaften beider Verfahren herausstellen, sollen Vor- bzw. Nachteile sowie Möglichkeiten und Grenzen bei der Frage der zu verarbeitenden Werkstoffe, der thermischen Belastung und deren Auswirkung speziell in Bezug auf diese beiden häufig angewendeten Verfahren aufgezeigt und bewertet werden. In diesem Zusammenhang erfolgen Versuchsschweißungen an Blechplatten unterschiedlicher Werkstoffe und verschiedener Blechdicken, die anschließend mittels gängiger Prüfverfahren auf ihre Belastbarkeit untersucht werden.

Außerdem erfolgt eine kurze Kostenanalyse, die die wichtigsten wirtschaftlichen Aspekte berücksichtigt. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass eine allgemeingültige Aussage zur Wirtschaftlichkeit nicht erfolgen kann, da diese von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist, die eine präzise Vergleichbarkeit ausschließen bzw. als nicht sinnvoll erscheinen lassen. So unterscheiden sich die Schweißanlagen in Investitions- und Betriebskosten bereits erheblich. Außerdem hängen die Investitionskosten für die jeweils erforderliche Spanntechnik in hohem Maße von der Geometrie der Fügeteile ab. Ein weiterer Bestandteil dieser Arbeit ist es daher, aus festen Kosten (Investition, Abschreibung und Zinsen) und variablen Kosten (Energie- und Wartungskosten) der zu vergleichenden Schweißanlagen einen vereinfachten Maschinenstundensatz zu errechnen, der durch Darstellung der Relationen eine Vergleichbarkeit ermöglicht. Zusammen mit den bereitgestellten praktischen Untersuchungsergebnissen soll die Ausgangssituation des Anwenders verbessert und die Selektion eines wirtschaftlichen Fügeverfahrens vereinfacht werden.

### 3 Die Entwicklung von Tailored Blanks

Tailored Blanks werden seit Mitte 1980 eingesetzt und seit dieser Zeit kontinuierlich weiter entwickelt. Steigender Bedarf an Blechformaten, die über die maximale Walzbreite hinausgehen sowie Anforderungen, die durch herkömmliche Einzelbleche nicht erfüllt werden konnten, führten zur Entwicklung von Tailored Blanks. Exakt auf die jeweiligen Erfordernisse zugeschnittene Produkte sind heute bei allen großen Automobilproduzenten fest etabliert. Über 30 Millionen Platinen werden pro Jahr in Europa hergestellt, und der Bedarf soll lt. aktuellen Prognosen in den nächsten Jahren weiter steigen (Abb. 1). Die Einsatzgebiete sind vielfältig, angefangen von PKW-Seitenteilen und -Türen, über Radhäuser und Längsträger, Heckklappen bis hin zu ganzen Bodenelementen. Im Durchschnitt kommen heute in einem PKW drei Tailored Blanks zum Einsatz. Es gibt jedoch auch Hersteller, die in ihren Fahrzeugen zehn und mehr maßgeschneiderte Blechhalbzeuge einsetzen. Der Bedarf steigt ständig was zur Folge hat, dass auch entsprechend spezielle, variantenflexible Schweißanlagen nachgefragt und entwickelt werden.

Beim Fertigungsleichtbau kommen verschweißte Bleche mit unterschiedlichen Eigenschaften mit dem Ziel zum Einsatz, das Bauteil werkstoffseitig einerseits in den hoch beanspruchten Bereichen zu verstärken und andererseits das Gewicht in weniger beanspruchten Bereichen zu reduzieren. Neben dem hohen Leichtbaupotential ermöglichen Tailored Blanks eine Optimierung der Bauteiltoleranzen, Kostenersparnis durch Verringerung der Teile sowie eine Erhöhung der Crashperformance.

Wurden in den Anfängen der Entwicklung maßgeschneiderte Blechplatinen ausschließlich mit linearen Schweißnähten gefertigt, gelang es Ende der 1990er Jahre Platinen mit nichtlinearen, in freien Radien verlaufenden Schweißnähten (sog. Engineered Blanks) in Serie zu produzieren. Hierdurch können die Platinen sehr genau auf die im Bauteil herrschenden Belastungsverhältnisse zugeschnitten werden. Beliebig erzeugbare Geometrien erlauben höchste Gestaltungsfreiheit. Die Gewichtsersparnis durch den Einsatz dieser innovativen Stahlprodukte liegt zwischen 20 und 40 % [43]. Um dem verstärkten Trend der Industrie zur Modulbauweise Rechnung zu tragen, werden inzwischen - basierend auf der Weiterentwicklung von Tailored Blanks - bauteilnahe Strukturen mit 2D- und 3D-Konturnähten (Tailored Components) in unterschiedlichen Blechstärken und Werkstoffen miteinander verschweißt. Daraus resultiert ein weiteres Gewichtsreduzierungs- und Kostendämpfungspotential.

Nach anfänglich beschränktem Anwendungspotential in den Anfängen der industriellen Herstellung von Tailored Blanks im Automobilbau entwickelte sich Mitte der 1990er Jahre ein breites Einsatzfeld.

In Abb. 1 ist die Marktentwicklung der Tailored Blanks in Europa in Aufteilung nach Bauteilgruppen dargestellt:

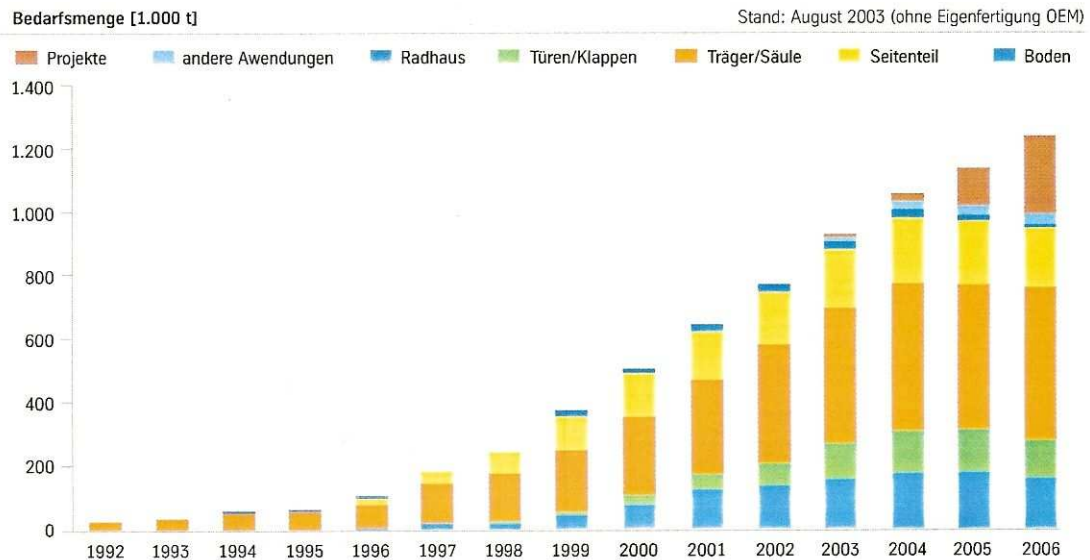


Abb. 1: Marktentwicklung der Tailored Tailored Blanks in Europa (Thyssen Krupp)

## **4 Stand von Wissenschaft und Technik**

### **4.1 Konduktives Hochfrequenzschweißen von Platinen**

Das konduktive wie auch das induktive Hochfrequenzschweißverfahren ist bisher vor allem aus der Rohrherstellung im kontinuierlichen Prozess bekannt und ist seit Jahren ein standardisiertes Verfahren. Zahlreiche Untersuchungen beschäftigten sich in der Vergangenheit aufgrund erhöhter Nachfrage mit der Steigerung der Effizienz von Rohrschweißanlagen und der Verbesserung der Schweißprozesse im Hinblick auf die Ausschussraten und die Qualität der Schweißnaht. Die Einsatzgebiete der Hochfrequenzschweißtechnik zu erweitern, war in den vergangenen Jahren das Ziel vieler Untersuchungen und wissenschaftlicher Forschungsarbeiten. So gelang es in jüngerer Zeit, die Vorteile des Hochfrequenzschweißens in der Rohrherstellung auf die Herstellung von Blechplatinen mit linearen Nähten auf solche mit nicht linearen Nähten und auch konturierten Bauteilen zu übertragen, sowie die Kenntnisse um die Möglichkeiten der Herstellung metallischer Mischverbindungen zu erweitern. Allerdings muss sich die Anwendung des Hf-Prozesses in Bezug auf die Herstellung von Tailored Blanks und Tailored Components noch für den großindustriellen Einsatz qualifizieren. Eine stärkere Verbreitung und wirtschaftliche Relevanz bedingt detailliertes Wissen um thermophysikalische Abläufe in der Schweißtechnik und deren Beeinflussung. Die Prozesstechnik und die Parametereinflüsse unterscheiden sich im Vergleich zur Herstellung von Rohren wesentlich. Der Einfluss auf die Erwärmungszeit und die Wärmemenge wird bei Rohren durch die Geometrie des Schweißspaltes in Kombination mit der Schweißzeit bestimmt. Die Geometrie des Schweißspaltes bei Rohren verläuft V-förmig. Die Erwärmungszeit und der Wärmeeintrag wird durch die Länge und aufgrund der V-Form linear abnehmenden Breite bis hin zum Schweißspalt bestimmt. Beim Fügen von Platinen besitzt der Schweißspalt über die gesamte Schweißnahtlänge eine konstante Breite. Ein weiterer Unterschied besteht in den Schweiß- und Spannwerkzeugen, die die Bauteile beim CHFV-Prozess über die gesamte Schweißnahtlänge kontaktieren [31]. Im Gegensatz zur Rohrherstellung treten beim Schweißen von Blechplatinen keine Relativbewegungen auf, somit unterliegen die Kontaktelemente nur einem geringfügigen Verschleiß. Untersuchungen zum konduktiven Hochfrequenzschweißen in Verbindung mit Feinblechwerkstoffen wurden bereits erfolgreich in Bezug auf die Eignung von Mehrphasen-, Dualphasen- und TRIP-Stählen sowie den konventionellen Tiefzieh- und mikrolegierten Stählen durchgeführt und sind in [16] erläutert. Die Möglichkeiten der Herstellung von Konturbauteilen mit artfremden Mischverbindungen werden in [38] dokumentiert. Umfassende Untersuchungen der elektrischen und geometrischen Parametereinflüsse auf die Erwärmung der Fügekannten beim Schweißen von Platinen aus artgleichen Stahl und Stahl/Aluminium-Verbindungen, insbesondere die Auswirkungen durch Variation der Ausspannlänge und Spaltbreite und deren Ausnutzung werden in [31] beschrieben.

#### 4.1.1 Verfahrensbeschreibung und Prozessgrundlagen

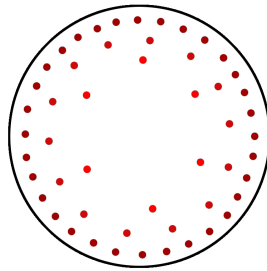
Das konduktive Hochfrequenzschweißen (CHFV) ist ein Widerstandspressschweißverfahren, bei dem ein Wechselstrom hoher Frequenz über Stromschienen oder Schleifkontakte direkt über die zu fügenden Bauteile geleitet wird. Auf Grundlage der Ohm'schen Verluste bewirkt der hochfrequente Strom eine Widerstandserwärmung nach dem Joule'schen Gesetz

$$Q = \int_{t=1}^{t=2} I^2 * R * dt$$

Unter Verwendung eines kombinierten Schweiß- und Spannwerkzeuges, das aus mehreren Spannelementen besteht, werden die Platinen mit einem definierten Abstand parallel zueinander positioniert und gespannt. Dann wird der Strom eingeschaltet. Die darauf folgende gleichzeitige Erwärmung beider Fügekanten im Zusammenhang mit einem mechanischen Pressvorgang (In-Time-Prozess) erzeugt eine stoffschlüssige Verbindung bei nur geringer Wärmebeeinflussung. Die Stromzeit kann bis auf eine 1/100 Sekunde genau vorgewählt werden [38].

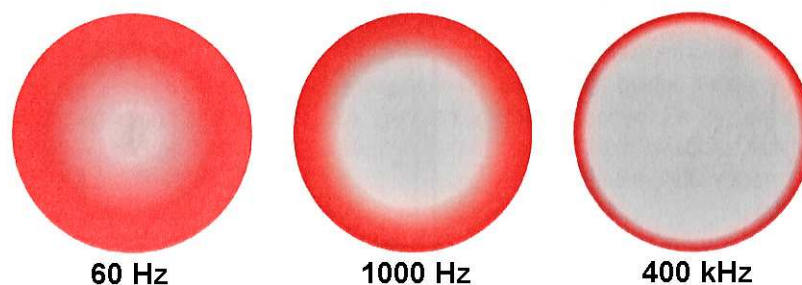
##### 4.1.1.1 Elektrodynamische Effekte (Skin- und Proximityeffekt)

Die gezielte Erwärmung wird durch den Skin-Effekt ermöglicht, der bei hochfrequenten Strömen auftritt. Dieser führt dazu, dass der Strom nur unmittelbar in den Kanten der Fügepartner fließt. Seine Eindringtiefe beträgt je nach Frequenz mehrere zehntel Millimeter. Das Auftreten des Skineffektes (auch Haut- oder Stromverdrängungseffekt genannt) lässt sich wie folgt erklären: Bei Wechselstrom verändert sich das Magnetfeld durch wechselnde Größe oder Polarität des Stromflusses dahingehend, dass nicht nur außen, sondern auch im Inneren des Leiters Wirbelströme erzeugt werden. Diese haben ein im Vergleich zum Leiterstrom umgekehrtes Vorzeichen [31]. Der Leiterstrom wird in der Mitte des Leiters abgeschwächt. Das den Strom umgebende Magnetfeld bewirkt, dass die Elektronen in der Mitte des Leiters von mehr Feldlinien umschlossen werden als die weiter außen liegenden Elektronen. Bei Wechselstrom induziert das wechselnde Magnetfeld dadurch im Inneren des Leiters eine höhere Gegenspannung als am Rand. In der Leitermitte ist die Gegenspannung am größten, was zur Stromverdrängung führt. Durch diesen Effekt kommt es zur Verkleinerung des wirksamen Leiterquerschnitts so dass nur noch zu einem Stromfluss in der äußeren Haut (Skin) des Leiters kommt. Nachfolgend ist die Stromdichte eines mit Wechselstrom durchflossenen Rundleiters (Querschnitt) bei erhöhter Frequenz schematisch dargestellt (Abb. 2). Die Stromdichte nimmt von der Leitermitte bis zur Oberfläche kontinuierlich zu [31].



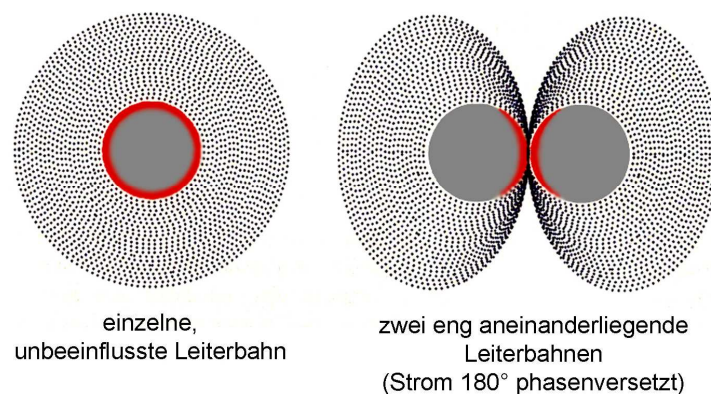
*Abb.2: Schema der Stromverteilung eines mit Wechselstrom durchflossenen elektrischen Leiters*

Der Skin-Effekt ist umso stärker ausgeprägt, je höher die Frequenz ist. Bei zunehmender Frequenz verringert sich der effektiv nutzbare Leiterquerschnitt. In Abb.3 ist die Veränderung der Stromdichteverteilung in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt.



*Abb. 3: Veränderung des wirksamen Leiterquerschnitts bei steigender Frequenz [58]*

Neben dem Skin-Effekt, der sich über das gesamte Volumen des Bauteils ausbreitet, wird durch den Proximity- oder Naheffekt die gewünschte Energiekonzentration an den Fügekannten bewirkt. Die Konzentration des Stroms auf einen so engen Bereich in den Kanten wird dadurch erhöht, dass sie nahe beieinander liegen und die Ströme in den Kanten in entgegengesetzte Richtungen fließen. Der Proximityeffekt lässt sich anhand der in Abb. 4 schematisch dargestellten Stromdichteverteilung erklären:



*Abb. 4: Stromdichteverteilung bei einem a) und zwei Leitern b) [58]*



Bild a) stellt die grundsätzliche Verteilung der Stromdichte eines mit Wechselstrom durchflossenen, unbeeinflussten Leiters mit elektromagnetischem Feld dar. Wird der Leiter in der Mitte geteilt, so dass nun zwei Leiterbahnen parallel zueinander liegen, kommt es zu einer gegenseitigen Beeinflussung. Die nun gegensinnig ausgerichteten Magnetfelder bewirken durch die Anziehungskraft eine Konzentration der Feldlinien zwischen den Leitern. Die Felder sind nun ellipsenförmig ausgebildet (Abb. 4b). Die roten Flächen kennzeichnen die Stromverteilung innerhalb der Leiter.

In der schweißtechnischen Praxis sind Skin- und Proximityeffekt gewöhnlich unerwünschte Erscheinungen, da sie bei Wechselstromanwendungen für die Erhöhung des Ohm'schen Widerstandes und damit für die Erhöhung der Verlustleistung verantwortlich sind. In Bezug auf das Hochfrequenzschweißen sind sie jedoch Voraussetzung für die Funktion des Prozesses, da sie eine stark lokale Erwärmung ermöglichen [16].

Durch die aufgezeigten elektrodynamischen Effekte weisen Schweißnähte, die mittels Hochfrequenzschweißen ausgeführt wurden, eine geringe Wärmeeinflusszone und damit eine hohe Qualität aus, da durch den verfahrensbedingten Stauchprozess die Schmelze aus der Naht herausgepresst wird. Entscheidend ist, dass sich die Fügekanten vor dem Pressvorgang nicht abkühlen, insofern wird der Strom erst unmittelbar vor der Stauchung abgeschaltet. Die Wärmeeinbringung erfolgt bis kurz unter den Schmelzpunkt, so dass die entstehende Schweißnaht noch kein Gussgefüge aufweist. Durch eine definierte Stauchkraft erfolgt die Schließung des Spaltes, der erweichte Werkstoff wird aus der Schweißnaht herausgepresst, wobei ein Stauchwulst entsteht. Während der Verbindung kann durch eine Messvorrichtung die Stauchverkürzung ermittelt werden. Die Nahtüberhöhung ist gewöhnlich kleiner als die reine Überlappung bei mechanischen Fügeverfahren, wie zum Beispiel dem Clinchen oder Nieten und kann in einem nachfolgenden Arbeitsgang problemlos abgetragen werden, ohne die guten mechanisch-technologischen Eigenschaften der Fügezone zu beeinträchtigen. Strebt man einen Einsatz des fertigen Bauteils im nicht sichtbaren Bereich an, wie zum Beispiel bei Trägerstrukturen, kann auf die Abarbeitung des Stauchwulstes aus ökonomischen Gründen ganz verzichtet werden [39].

In Abb. 5 ist das Handhabungssystem des konduktiven Hochfrequenzschweißen für die Herstellung von Platinen schematisch dargestellt.

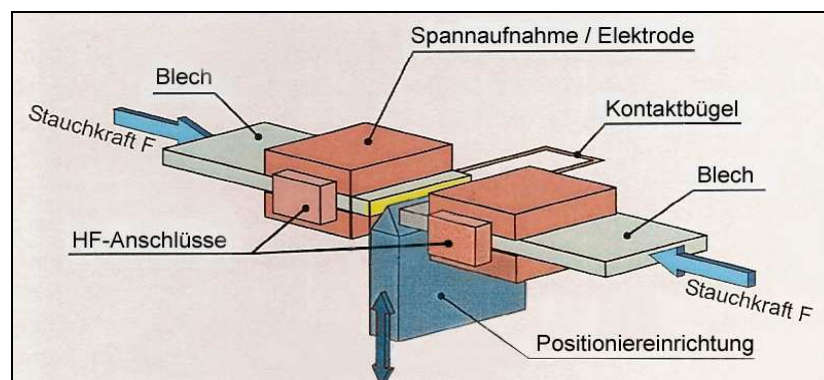


Abb. 5: Schema konduktives Hochfrequenzschweißen von Platinen

#### **4.1.2 Prozessparameter beim induktiven Hochfrequenzschweißen**

Der CHFW-Prozess wird durch folgende Prozessparameter bestimmt:

Leistungsparameter	→	Generatorleistung und Schweißzeit
Mechanische Parameter	→	Stauchkraft
Geometrische Parameter	→	Ausspannlänge und Spaltbreite

##### **4.1.2.1 Generatorleistung und Schweißzeit**

Beim induktiven Hochfrequenzschweißen erfolgt die Erwärmung durch direkten, galvanischen Kontakt von Hochfrequenzgenerator und Bauteil. Es werden Hf-Generatoren im Frequenzbereich zwischen 200 und 2000 kHz eingesetzt. Mit Hilfe der Generatorleistung und der Schweißzeit lässt sich die durch Widerstandserwärmung an den Stoßkanten und in der Fügezone einzubringende Wärmeleistung bestimmen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Stoßkanten durch zu hohe Einstellungen aufschmelzen und zur unerwünschten Tropfenbildung und übermäßig ausgeprägtem Stauchwulst neigen können. Dies hätte unmittelbare Auswirkungen auf die Nahtausbildung infolge von inhomogener Ausprägung und ungleichmäßiger Überhöhung. Im Sinne der Energieeffizienz und minimalen Gefügebeeinflussung des Werkstoffes wird die Generatorleistung auf minimalen Output für jede Schweißaufgabe modifiziert [38].

##### **4.1.2.2 Stauchkraft**

Die Stauchkraft muss so gewählt werden, dass eine ausreichende Stauchverkürzung erzielt wird, um die unerwünschte Werkstoffschmelze oder Verunreinigungen sicher aus der Bindeebene zu entfernen. Eine zu hohe Stauchkraft würde zu einem Abknicken der Fügepartner bzw. zu einem Kantenversatz in der Fügeebene und zu einer übermäßigen Wulstausbildung führen. Ist die Wärmeeinbringung dagegen zu gering, kommt es zu Bindefehlern und die für den Hf-Prozess typische Wulstbildung bleibt aus. Bei Hybridschweißungen mit Werkstoffen, die unterschiedliche Festigkeitskennwerte besitzen, verformt sich der weichere Werkstoff stärker. Beim freien Aufstauchen verkürzen sich die zu erwärmenden Bauteilkanten unter der konstanten Stauchkraft, bis die mit abnehmender Temperatur steigende Gegenkraft (plastische Verformung der erwärmten Fügekanten) gleich der Stauchkraft ist. Durch das freie Aufstauchen können auch größere Toleranzschwankungen bei der Nahtkantenvorbereitung ausgeglichen werden, sofern eine daraus resultierende unterschiedliche Gesamtbauteiltoleranz akzeptiert werden kann.

Neben dieser individuellen, von Verformungsgrenze durch Abkühlung und Stauchkraft bestimmten Verkürzung ist jedoch auch eine geregelte, durch einen Anschlag reproduzierbare Stauchverkürzung möglich. Dies hat den Vorteil einer optimalen Ausprägung des entstehen-

den Wulstes. Hierdurch ergibt sich die Stauchverkürzung jedoch nicht durch das Verhältnis von Werkstoffeigenschaft und Stauchung, sondern wird durch den Anschlag bestimmt [26].

#### 4.1.2.3 Ausspannlänge und Spaltbreite

Die Spannwerkzeuge zur Positionierung des Werkstückes dienen beim CHFW-Prozess gewöhnlich als Stromkontaktelemente. Unterschiedliche Energiezufuhr und Wärmeeintrag in die zu fügenden Blechteile kann mit entsprechender Variation der Ausspannlänge erfolgen. So lässt sich der Wärmeeintrag für jeden Fügepartner individuell einstellen und erleichtert somit das Schweißen von Mischverbindungen. Die Ausspannlänge  $a$  bezeichnet die Länge, die die Bleche über die Stromkontaktelemente hinausragen während die Spaltbreite  $b$  den Abstand der Fügekanten zueinander beschreibt (Abb. 6). Der Hf-Strom nimmt den Weg des geringsten Widerstandes und fließt besonders im gegenseitigen Annäherungsbereich. Mit steigender Ausspannlänge erhöht sich die Wärmemenge, mit abnehmender Ausspannlänge reduziert sich die die Wärmemenge an den Fügekanten bei sonst gleichen Prozessparametern.

Durch den Proximityeffekt (Naheffekt) konzentriert sich der Schweißstrom an den Fügekanten und ebenso an den Innenseiten der Stromschienen. Mit Vergrößerung der Ausspannlänge vergrößert sich der Spalt zwischen den Stromschienen was zur Folge hat, dass der Naheffekt in diesen abgeschwächt wird. Bleibt der Schweißspalt konstant, fließt ein bestimmter Teil des Stromes, der zuvor durch die Stromschienen geflossen ist, nun zusätzlich an den Fügekanten. Der Schweißspalt bestimmt die Wirkung des Naheffektes. Je kleiner der Schweißspalt ist, umso größer ist der Naheffekt und umso mehr Energie kann in den Fügekanten umgesetzt werden [26]. Die Möglichkeit dieser Variation bietet den Vorteil, dass nicht nur lineare Bleche mit hohen Geschwindigkeiten miteinander verschweißt werden können, sondern auch andere Geometrien, unterschiedliche Blechdicken und vor allem Mischlegierungen. Insbesondere für die Verschweißung von Leichtmetallen, wie Aluminium und Stahl-Aluminium-Verbindungen ist die Steuerbarkeit der Wärmeeinflusszone sehr vorteilhaft und oft unabdingbar [31], [16].

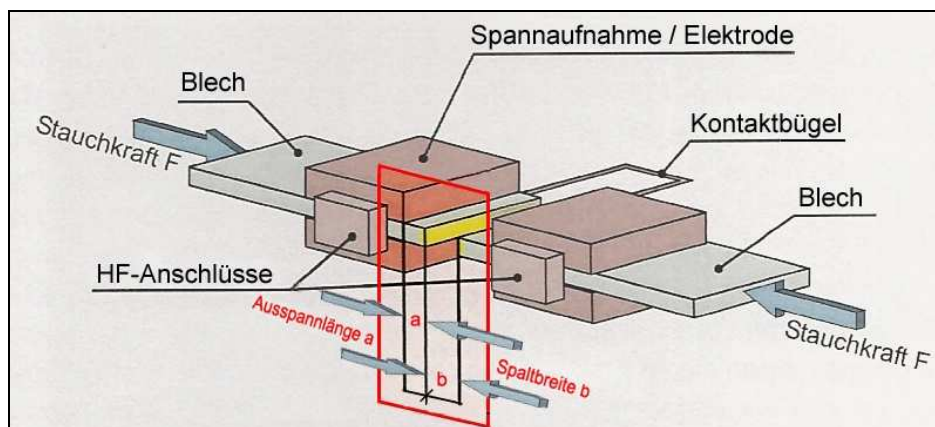
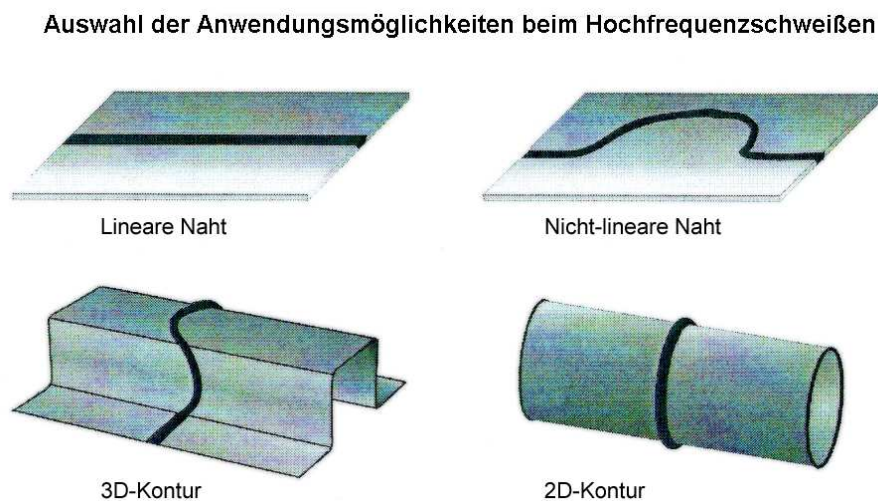


Abb. 6: Die geometrischen Prozessparameter Ausspannlänge und Spaltbreite

Die Platinen werden in der Spannvorrichtung zu beiden Seiten der Verbindung über die gesamte Länge in Position gehalten. Die Ausspannlänge  $a$  und die Spaltbreite  $b$  werden eingestellt. Nach Einschalten des Stroms bringt der bewegliche Tisch (Stauchschlitten) die in den Spannelementen/Elektroden arretierten Blechteile in Kontakt und der Schweißvorgang beginnt. In Abhängigkeit der Position des Stauchschlittens zu den Fügeteilen erfolgt die Stromabschaltung kurz vor Bauteilkontakt. Der Zeitpunkt der Abschaltung wird so spät wie möglich gewählt, um eine vorzeitige Abkühlung der Kanten zu vermeiden. Während des Fügens werden die Blechkanten mit einer definierten Stauchkraft zusammen gedrückt und stoffschlüssig miteinander verbunden. Die Steuerung und Überwachung des Schweißprozesses ist präzise und einfach mit einem PCD-System (Process Documentation Control) möglich [16].

#### 4.1.3 Hochfrequenzschweißbare Geometrien

Das Hochfrequenzschweißverfahren stellt als Fügechnik in Bezug auf die Herstellung von Tailored Blanks eine relativ neue Fügevariante dar. Die in Abb. 7 dargestellten Geometrien markieren den heutigen Stand der möglichen Fügevarianten, wobei noch zwischen dem Schweißprozess mit induktiver und konduktiver Wärmeeinbringung unterschieden werden muss.



*Abb. 7: Prinzipskizzen hochfrequenzschweißbarer Bauteile*

Das induktive Hochfrequenzschweißen ist bereits aus der Rohrherstellung bekannt und hier eine seit Jahren etablierte Technik. Sie soll im Rahmen dieser Arbeit jedoch nur peripher und in Bezug auf die Schweißmöglichkeiten erwähnt werden, da sich in der Vergangenheit bereits zahlreiche Forschungsarbeiten diesem Thema gewidmet haben. Im Gegensatz zum linearen Hochfrequenzschweißen mit konduktiver Energieeinbringung sind beim induktiven Verfahren die Platinen galvanisch von der Energiequelle getrennt. Der Strom zur Erhitzung der Fügekanten wird ausschließlich durch den Induktor induziert. Ein weiterer Unterschied

bei der schweißtechnischen Verarbeitung von Platinen oder Profilen gegenüber der kontinuierlichen Rohrfertigung ist, dass zwischen dem zu fügenden Bauteil und der Spannvorrichtung keine Relativbewegungen stattfinden und somit nur geringe Verschleißerscheinungen auftreten. Aus diesem Grunde wird für diese Anwendung der CHFV-Prozess aufgrund des höheren Wirkungsgrades bevorzugt. Darüber hinaus bestimmt die Geometrie des zu schweißenden Bauteils die Wahl des Schweißverfahrens. Geschlossene Profile sind prozessbedingt nur mit dem induktiven Schweißprozess herzustellen.

Dem Trend der Automobilindustrie folgend, in zunehmendem Maße komplexe, bauteiloptimierte Halbzeuge aus unterschiedlichen Werkstoffen mit linearen und nicht-linearen Nähten einzusetzen, bietet der CHFV-Prozess einen weiteren Vorteil: Freie Radien, enge Konturen oder Formen haben keinen Einfluss auf die hohe Schweißgeschwindigkeit [16].

Die Verwendung von Trägerstrukturen mit nicht-linearen Nähten trägt beim Karosseriebau zur Erhöhung der Steifigkeit bei gleichzeitiger Verringerung des Fahrzeuggewichts dadurch bei, dass die Naht gezielt den Anforderungen entsprechend angepasst werden kann. Zusätzlich ist es möglich, auch Werkstücke mit größeren Geometrietoleranzen sicher zu fügen. Dazu muss allerdings das Schweiß- und Spannwerkzeug eine schlechte Bauteilvorbereitung ausgleichen können, um eine reproduzierbare, vollständige Verschweißung der Bauteile zu gewährleisten. Vorteilhaft ist, dass durch diesen Hf-spezifischen Prozess auf ein teures und apparativ aufwendiges Nahtverfolgungssystem verzichtet werden kann.

Eine Weiterentwicklung der Tailored Blanks mit linearen und nicht-linearen Nähten stellen Tailored Components, z. B. Konturbauteile in 2D- und 3D-Ausführung unter Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe und Blechdicken dar (s. Abb. 7).

Die Hochfrequenzschweißtechnik mit konduktiver Energieübertragung kehrt die klassische Prozesskette „Fügen - Umformen“ in Bezug auf die Herstellung von Konturbauteilen um. Die Möglichkeit, bereits umgeformte Bleche zu einem kompletten Bauteil fügen zu können, erschließt dem Hf-Schweißen umfassenderes Potential. Durch die Änderung der Prozesskette müssen große Konturbauteile nicht mehr als ein Bauteil umgeformt werden, sondern lassen sich direkt nach dem Umformen im Pressentakt fügen. Dies hat mehrere Vorteile; zum einen können die benötigten Pressen, Werkzeuge und die umzuformenden Einzelbauteile kleiner und somit kostengünstiger gestaltet werden, zum anderen erzielt man durch die verkürzte Prozessgestaltung logistische Vorteile durch Vereinfachung und Zusammenfassung der Fertigungsvorgänge. Allerdings bedarf es für diesen Fertigungsprozess der Entwicklung eines geeigneten Spannsystems [12], [39].

Der starke Trend zur Modularisierung bedingt einen universell einsetzbaren, voll mechanisierten Schweißprozess und fördert die Gestaltung zukunftsrobuster Fabrikstrukturen. Das Hf-Schweißen birgt das Potential, sich in den nächsten Jahren als Schlüsseltechnologie zu

etablieren. So könnten zum Beispiel auch kleineren Zulieferern der Automobilindustrie Chancen eröffnet werden, die Verantwortung für große Strukturbauteile in Form kompletter Produktionsmodule zu übernehmen [39].

#### 4.1.4 Charakterisierung der Vorgänge in der Fügezone

Die Verbindungsbildung beim Hf-Schweißen erfolgt im Gegensatz zu den Strahlschweißverfahren bei deutlich niedrigen Temperaturen, so dass das Gefüge keine ausgeprägte schmelzflüssige Phase aufweist. Die minimierte Erwärmung führt auch bei höherfesten Stählen im Gegensatz zu Strahlschweißverbindungen zu einer geringeren Gefügebeeinflussung und besseren mechanisch-technologischen Eigenschaften. Die unter Umständen auftretenden geringen Schmelzmengen werden durch den Stauchvorgang aus der Bindeebene herausgedrückt. Somit stellt sich in Hf-Verbindungen ein flacher Härtegradient und ein sehr gleichmäßiger Härteverlauf ein. In Abhängigkeit von der erreichten Spitzentemperatur kann man beim Hf-Schweißen von Stahlblechen folgende Bereiche unterscheiden:

$T_{\max} \approx 500 - 700^{\circ}\text{C}$ : Subkritischer Bereich

Es können lediglich Anlasseffekte auftreten. Eine Austenitisierung findet nicht statt.

$T_{\max} \approx 750^{\circ}\text{C}$ : Interkritisch erhitzter Bereich

Das Gefüge wird bis in das Zweiphasengebiet erhitzt

$T_{\max} \approx 900 - 1100^{\circ}\text{C}$ : Feinkornzone

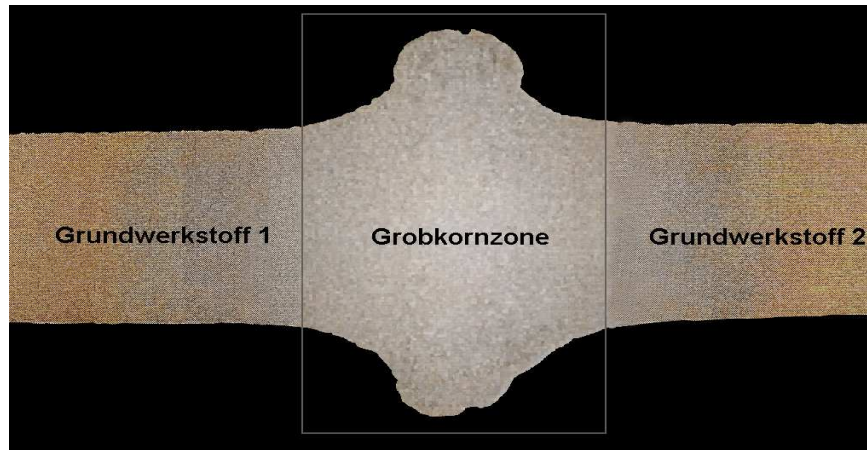
Es kommt zu einer doppelten  $\alpha$ - $\gamma$ -Umwandlung, die zu einem feinkörnigen Gefüge führt.

$T_{\max} > 1100^{\circ}\text{C}$ : Grobkornzone

Die starke Überhitzung führt zur Auflösung von Ausscheidungen und zum Austenitkornwachstum. Bei der  $\alpha$ - $\gamma$ -Umwandlung bildet sich eine grobe Struktur aus. In dieser Zone werden die höchsten Härtewerte ermittelt [13].

Die Grobkornzone ist der für die Verbindungseigenschaften entscheidende Bereich einer Hf-Schweißnaht.

In Abb. 8 ist die Nahtausbildung als 3-Zonen-Modell dargestellt:



*Abb. 8: Nahtausbildung einer Hf-Schweißung im 3-Zonen-Modell*

#### **4.1.5 Prozessintegrierte (in-situ) Vorwärmung und Wärmenachbehandlung**

Um die Anwendungsgebiete der Hochfrequenzschweißtechnik weiter zu qualifizieren und zu quantifizieren, insbesondere in Bezug auf die Verwendung lokal verfestigter Werkstoffe, ist die definierte Gestaltung des Prozessablaufes und der physikalischen Randbedingungen (Ausführung der Schweiß- und Spannwerkzeuge) zur bewussten Steuerung der Strom-, Temperatur- und Druckspannungsverläufe und deren Auswirkungen über die gesamte Schweißnaht einschließlich der Wärmeeinflusszone entscheidend, damit gewünschte Reaktionen erzielt werden. Die Hochfrequenzschweißtechnik und Hochfrequenzerwärmungstechnik in einem in-situ-Prozess, d. h. in einer Aufspannung und in einem Prozessablauf implementiert, bietet die geeignete Grundlage zur Beeinflussung und Verbesserung der Strukturfestigkeit bei der Verarbeitung von hochfesten, lokal beeinflussten Werkstoffen.

Die Integration der thermo-mechanischen Behandlungsmöglichkeit der Werkstücke ist beim Hf-Prozess gegeben. Je nach verwendetem Werkstoff sind verschiedene Temperatur-Zeit-Zyklen anwendbar und damit unterschiedliche Verfestigungsmöglichkeiten realisierbar. Diese reichen von der Feinkornbildung durch die Umformung während der Umwandlung über die spannungsinduzierte Ausscheidung bei NE-Metallen bis zur Erzeugung eines sehr feinnadeligen Martensits [54].



#### **4.1.6 Vor- und Nachteile des Hf-Schweißprozesses**

##### Vorteile

- Hohe erreichbare Schweißgeschwindigkeiten unabhängig von der Nahtlänge
- Durch kurze Schweißzeiten bedingte geringe Beeinflussung der Gefügestruktur/schmale Wärmeeinflusszone
- Durch den Stauchvorgang entsteht ein feinkörniges Gefüge
- Hoher Wirkungsgrad bei geringem Energieverbrauch
- Geringe Beeinflussung des Werkstoffes durch minimierte, gleichmäßig konzentrierte Kantenerwärmung
- Gute Toleranzverträglichkeit
- Einfache und kostengünstige Schweißnahtvorbereitung
- Hohe Flexibilität bei Bauteilvarianten
- Hoher Automatisierungsgrad
- Präzise Parameterüberwachung und Dokumentation ist leicht möglich
- Schweißbarkeit komplexer Blechstrukturen
- Schweißbarkeit konventioneller höherfester und hochfester Stahlblechgüten
- Der Schweißprozess benötigt keine Zusatzwerkstoffe
- Möglichkeit einer prozessintegrierten Vorwärm- und Wärmenachbehandlung
- Günstiges Umformverhalten der Schweißnaht
- Der Hochfrequenzgenerator ist wartungsarm und benötigt keine Betriebsmittel

##### Nachteile

- Bildung eines Stauchwulstes, der für den sichtbaren Bereich abgetragen werden muss
- Höherer Materialverbrauch durch Abarbeiten des Stauchwulstes
- Nachrüsten von Umformwerkzeugen zur Entfernung der Nahtüberhöhung
- Bei zu hoher Energieeinbringung ist eine Tropfenbildung an der Schweißnaht nicht auszuschließen
- Die Stromkontaktelemente unterliegen dem Verschleiß
- Für komplexe Bauteile müssen bedarfsgerechte Schweiß- und Spannwerkzeuge angefertigt werden [26] [38].



## 4.2 Laserstrahlschweißen von Platinen

Für die Herstellung von lasergeschweißten Tailored Blanks haben sich im großindustriellen Einsatz ausschließlich CO<sub>2</sub>-Laser und Festkörperlaser aufgrund ihrer dauerhaft hohen Leistung und hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten durchgesetzt. Der Schwerpunkt des Laserstrahlschweißens liegt im Fahrzeugbau sowie in der Luft- und Raumfahrttechnik. Der CO<sub>2</sub>-Laser wird für die Herstellung von Tailored Blanks mit linearen Nähten eingesetzt. Mit dem Nd:YAG-Laser können Tailored Blanks mit nicht linearen Nähten (Tailored Engineered Blanks) präzise gefertigt werden. Bei der Strahlführung muss zwischen CO<sub>2</sub>-Lasern und Festkörperlaser unterschieden werden. CO<sub>2</sub>-Strahlung lässt sich nur bis zu Leistungen von wenigen hundert Watt durch Lichtleitfasern leiten, was für die Strahlung von Nd-YAG-Lasern auch im Kilowatt-Leistungsbereich kein Problem ist. Die Anwendung der jeweiligen Lasertypen wird durch die Art des Werkstoffes und der Geometrie bestimmt.

## 4.3 Eingesetzte Laser

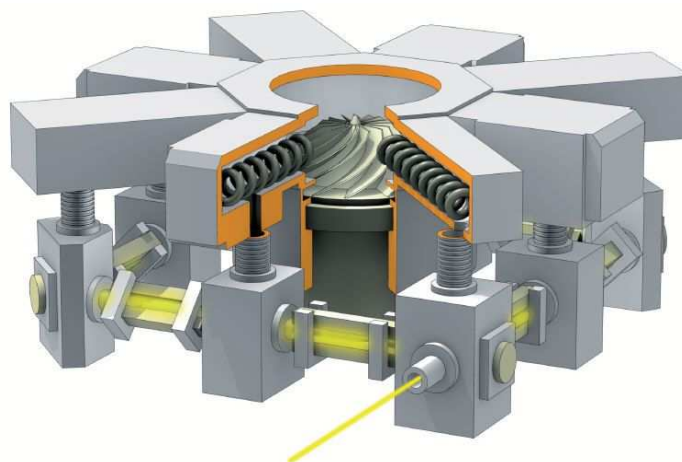
### 4.3.1 CO<sub>2</sub>-Laser

CO<sub>2</sub>-Laser (Gaslaser) (Abb. 9) erzeugen infrarote Laserstrahlung bei 10,6 µm Wellenlänge. Die gängigen Ausgangsleistungen liegen heute bei bis zu 20 kW. Der Betrieb ist kontinuierlich (cw) und gepulst (pw) möglich. Das Lasermedium besteht aus einem Gemisch aus Kohlendioxyd (CO<sub>2</sub>), Stickstoff (N<sub>2</sub>) und Helium (He) im Mischungsverhältnis 1:1:8, wobei CO<sub>2</sub> das eigentliche Lasermedium darstellt, N<sub>2</sub> als Energiespeicher- und überträger dient und He zur Abfuhr der Wärme benötigt wird. Das Lasergas befindet sich in Rohren aus Quarzglas, die die Entladungsstrecke bilden. Außen an den Rohren sitzen Elektroden, die die Anregungsenergie berührungslos in das Lasergas einkoppeln. Moderne Strahlquellen sind durch eine sehr kompakte und stabile Resonatorgeometrie gekennzeichnet, die eine applikationsangepasste Leistungsskalierung in Verbindung mit optimierter Strahlqualität bietet. Für erforderliche Laserleistungen in der Fertigungstechnik von einigen 100 W bis zu mehreren Kilowatt muss die Entladungsstrecke mehrere Meter lang sein. Damit die Strahlquelle trotzdem kompakte Außenmaße hat, wie in Abb. 9 am Beispiel des Aufbaus eines CO<sub>2</sub>-Lasers der Firma Trumpf zu sehen ist, können die Entladungsstrecken gefaltet und zum Beispiel quadratisch angeordnet werden. Umlenkspiegel reflektieren den Laserstrahl an den Ecken des Quadrats und verbinden die Entladungsstrecken optisch. Rückspiegel und Auskoppelspiegel vervollständigen den Resonator. In der Mitte der Strahlquelle sitzt ein magnetgelagertes Turboradialgebläse, das das Lasergas ständig umwälzt. Das Gas strömt an den Ecken des Quadrates in die Entladungsrohre und wird in der Mitte jeder Seite wieder abgesaugt. In den Zu- und Ableitungsgehäusen umströmt das Gas wassergekühlte Wärmetauscher und kühlt

ab. Der Gasmischer mischt das Lasergas aus Kohlendioxid, Helium und Stickstoff. Für den richtigen Betriebsdruck sorgt die Vakuumpumpe. Sie hält den Gasdruck bei etwa 100 Hektopascal [46].

Zur Anregung längs- oder quer geströmter Gaslaser hat sich im kW-Bereich der Einsatz von Hf-Generatoren durchgesetzt. Die Verwendung von längs- oder quer geströmten Lasern hängt ab vom jeweiligen Einsatzbereich. Bei sehr großen Leistungen ( $> 10$  kW) sind Entladung und Gasströmung quer zur Strahlrichtung, so dass ein besonders schneller Gasaustausch möglich ist. Damit sinken jedoch Wirkungsgrad und Strahlqualität.

In der Automobilindustrie werden überwiegend längs geströmte  $\text{CO}_2$ -Laser mit typischen Leistungen von ca. 6 kW vor allem zum Schweißen von Getriebeteilen, Kupplungen und Wellen, jedoch auch zum Hochgeschwindigkeitsschweißen von dünnwandigen Bauteilen eingesetzt. Ein Nachteil dieser Laser ist, dass sich ihr Strahl nicht durch Glasfaserkabel leiten lässt. Daher sind die Geräte auf ein kompliziertes Spiegelsystem angewiesen [46].



*Abb. 9: Kompakter Aufbau des  $\text{CO}_2$ -Lasers (Trumpf)*

Neben den geströmten Systemen, wo dem Gaskreislauf im Resonator ständig neues Resonatorgas zugeführt werden muss, stellen  $\text{CO}_2$ -Laser mit plattenförmiger Resonatorgeometrie, die sog. Slab-Laser (Abb. 10) mit Ausgangsleistungen bis etwa 5 kW eine in der Materialbearbeitung etablierte Weiterentwicklung ungeströmter  $\text{CO}_2$ -Laser dar. Diese verwenden keine Gasumwälzung, sondern eine mit Hochfrequenz betriebene Plasmaentladung zwischen zwei eng beieinander stehenden Platten (Resonatorwände), die zugleich Kühlung und Diffusion bewirken. Der Strahlweg wird durch Spiegel entlang der schmalen Stirnflächen gebildet, die Auskoppelung findet am verkürzten Ende eines der Spiegel statt. Damit das Lasergas effektiv gekühlt wird, muss der Abstand zwischen den Resonatorwänden möglichst gering und die Wandfläche möglichst groß sein. Da das Lasergas weder umgewälzt noch ständig erneuert werden muss und sich dadurch der Gasverbrauch auf ein Minimum reduziert, reicht eine in den Laser integrierte Gasversorgung für rd. 12 Monate Dauerbetrieb. Das Funktionsprinzip

des Slab-Lasers gestattet einen kompakten Aufbau der Strahlquellen in Verbindung mit sehr guter Strahlqualität und verringertem Serviceaufwand [32].

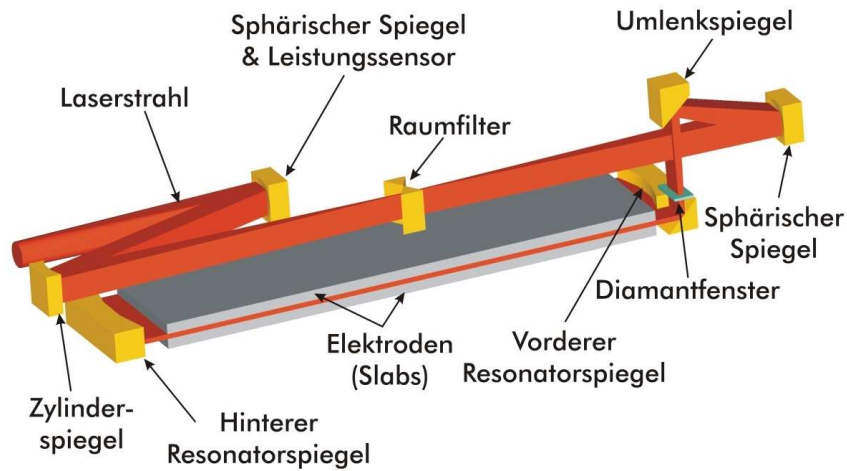


Abb. 10: Darstellung eines CO<sub>2</sub>-Slab-Lasers (Rofin-Sinar)

#### 4.3.2 Festkörperlaser

Festkörperlaser werden nach der Art des aktiven Materials (Nd:YAG, Nd:Glas, Yb:YAG), dessen Geometrie, (Stabform, Scheibenform, Faser) und nach der Art der Anregung (Blitzlampen, Bogenlampen, Laserdioden) unterschieden. Die Dauerleistung nach dem derzeitigen Stand der Technik bei Nd:YAG-Laser für die Materialbearbeitung beträgt 4 kW.

Der derzeit im industriellen Umfeld aufgrund der flexiblen Strahlführung über Lichtwellenleiter am häufigsten eingesetzte Festkörperlaser ist der Nd:YAG-Laser. Das laseraktive Medium ist ein YAG-Kristall (Yttrium-Aluminium-Granat) mit Neodym (Nd) -Ionen dotiert. Für die Anregung des optischen Resonators werden konventionell Blitzlampen im gepulsten Betrieb und Bogenlampen für den Dauerstrichbetrieb eingesetzt. Nd:YAG-Laser arbeiten bei einer festen Wellenlänge von 1,06  $\mu\text{m}$ . Der Wirkungsgrad beträgt maximal drei Prozent. Die Verlustwärme wird durch eine Wasserkühlung abgeführt. Die Auskoppelung des Laserstrahls erfolgt fast verlustfrei über Lichtleitfasern und wird so kostengünstig ohne gerätetechnischen und Justieraufwand an den Bearbeitungsort geleitet. Damit steht ein Werkzeug für mehrachsige bewegliche, automatisierte Fertigungseinrichtungen, wie z. B. Industrieroboter, zur Verfügung, womit auch schwer zugängliche Bauteile und komplexe 3D-Geometrien flexibel zu bearbeitet werden können.

In Abb. 11 ist der schematische Aufbau eines blitzlampengepumpten Nd:YAG-Lasers dargestellt [3].

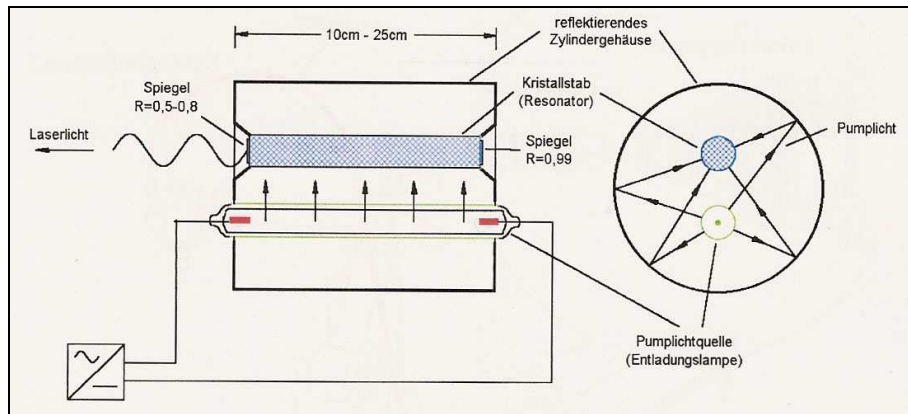


Abb. 11: Schematische Darstellung eines blitzlampengepumpten Nd:YAG-Lasers (bedea)

Neuere Entwicklungen nutzen den mit Wirkungsgraden von bis zu 50 % arbeitenden Hochleistungs-Diodenlaser als Pumplichtquelle für die Anregung von Festkörperlaser. Mit einer präzisen Abstimmung der Strahlung dieser Halbleiterlaser auf die Absorptionslinien des Festkörperlaserkristalls lässt sich der Wärmeeintrag in diesen minimieren und damit der Gesamtwirkungsgrad und die Strahlqualität verbessern. Im Vergleich zu den blitz- oder bogenlampenangeregten Systemen ergibt sich eine Verbesserung der Strahlqualität um ca. 30 % bei gleichzeitiger Steigerung des Gesamtwirkungsgrades auf  $\eta$  10....12 % [19]. Laserdioden haben eine typische Lebensdauer von 10.000 Stunden, während Bogenlampen nur ca. 1.000 Stunden erreichen. Dadurch ergeben sich längere Wartungsintervalle und höhere Anlagenverfügbarkeiten [34].

Seit der Entwicklung von Halbleiterlasern mit entsprechender Leistung werden Festkörperlaser immer häufiger mit Laserdioden geeigneter Wellenlänge optisch gepumpt. Dies ermöglichte die Realisierung von neuartigen Formen von Festkörperlaser: Faserlaser und Scheibenlaser. Bei Faserlasern bildet der dotierte Kern einer Glasfaser das aktive Medium. Die Pumpstrahlung gelangt durch die Endfläche der Faser in diese hinein oder eine Ummantelung der Faser führt die Pumpstrahlung entlang dem aktiven Faserkern. Aufgrund der großen Länge wird das Laserlicht in hohem Maße verstärkt. In modernen Systemen werden aus diesem Grunde Doppelmantelfasern eingesetzt. Mit dem kompakten und leistungsstarken Faserlaser lassen sich derzeit Strahlqualitäten von  $< 4,5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  erzielen. Mit den leistungsstärksten Lasern auf dem Markt können heute Strahlquellen mit mehr als 20 kW bei einer Strahlqualität von  $11 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  aufgebaut werden [18].

Beim Scheibenlaser (Abb. 12) erfolgt die Anregung durch Hochleistungs-Laserdioden. Das durch die Dioden emittierte Pumplicht hat eine Wellenlänge von 940nm und wird über einen parabolischen Reflektor auf eine dünne Scheibe gelenkt, die das laseraktive Material darstellt. Durch Reflexion an der beschichteten Rückseite der Scheibe trifft das nicht absorbierte Licht wieder den parabolischen Spiegel und von dort auf einen Retro-Reflektor, der einen erneuten Durchgang durch den Laserkristall bewirkt. Um eine möglichst vollständige Absorption der Pumplichts zu erreichen, wird durchläuft die Pumpstrahlung den Laserkristall mehrfach. Die beschichtete Scheibenrückseite und ein vor dem Parabolspiegel angeordneter

Auskoppelspiegel bilden den optischen Resonator. Der erzeugte Laserstrahl wird über geeignete Optiken direkt in eine Lichtleitfaser gekoppelt.

Auf einer Scheibe lässt sich eine Ausgangsleistung von 1,5 kW generieren. Diese Leistung kann aufgrund der hohen Strahlqualität in eine 150 µm Faser eingekoppelt werden. Durch den Einsatz von zwei Scheiben wird die Ausgangsleistung auf 3 kW verdoppelt, die dann in eine 200 µm Faser eingekoppelt werden kann. Im Vergleich zu lampengepumpten Systemen stellt dieser Wert eine Steigerung der Leistung pro Pumpkammer um Faktor 3, bei gleichzeitig verbesserter Strahlqualität dar [33].

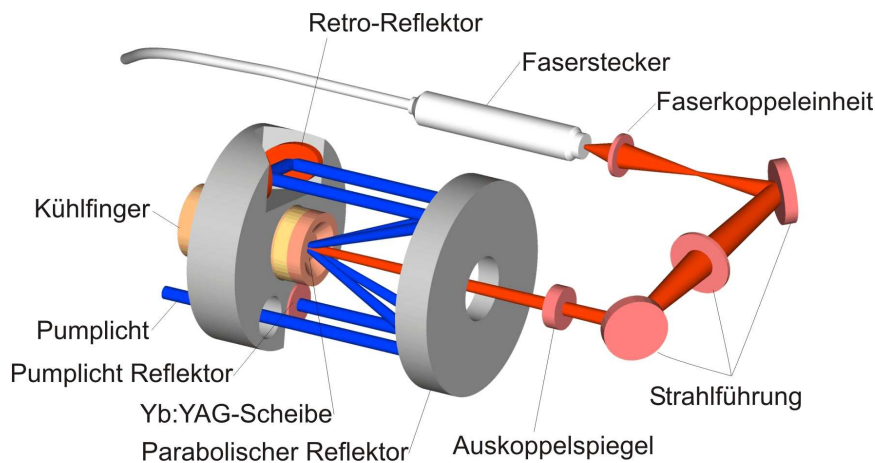


Abb. 12: Darstellung eines diodengepumpten Scheibenlasers (Rofin-Sinar)

#### 4.3.3 Maschinenrahmen, Bearbeitungs- und Spannvorrichtung

Der Laser wird vom Maschinenrahmen (stationäre Einrichtung) getragen. Das Halten und Spannen des Bauteils erfolgt ebenfalls durch stationär angebrachte Spannvorrichtungen, wobei sich der konstruktive Aufwand der Spanntechnik nach der Geometrie des Werkstücks richtet. Um den Schweißkopf in der Fügeebene genau zu positionieren, werden lokale Führungssysteme als Komponente eingesetzt. Das Strahlführungssystem leitet das Laserlicht über Umlenkspiegel oder Lichtwellenleiter vom Lasergerät zur Bearbeitungsstelle. Die Prozessgase (Schutzgas und Arbeitsgas) werden der Schweißstelle im oder am Schweißkopf zugeführt (Abb. 13). Sensoren, die gewöhnlich direkt am Schweißkopf montiert sind, erkennen und bestimmen die genaue Lage der Fügestelle, gleichen während des Schweißprozesses Toleranzen aus und sorgen dafür, dass sich der Schweißkopf immer genau über der Fügestelle befindet. Nahtfolgesensoren unterliegen hohen Anforderungen, denn eine schnelle Signalverarbeitung ist wichtig. Temperaturbeständigkeit und Störsicherheit gegenüber Funkenflug und Störfeldern sind Voraussetzung für den Einsatz in der Schweißtechnik, denn Temperatur und Schweißspritzer sind unvermeidlich. Zur visuellen Prozesskontrolle und zur

Qualitätsprüfung der Schweißnaht kann eine nachgeschaltete Kamera eingesetzt werden, die die Homogenität der Schweißnaht überprüft und lokale Schweißfehler erfasst.

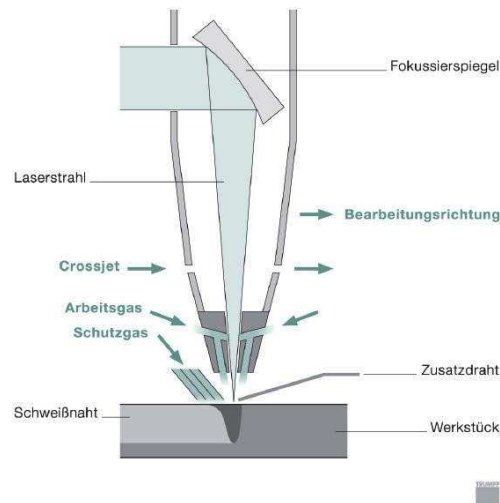


Abb. 13: Schweißkopf (Trumpf)

#### 4.3.4 Verfahrensbeschreibung und Prozessgrundlagen

Das Laserstrahlschweißverfahren zählt erst seit den 1970er Jahren zur Gruppe der Fügeverfahren. Beim Laserschweißen wird zwischen dem Wärmeleitungsschweißen und dem Tieferschweißen unterschieden:

##### 4.3.4.1 Das Wärmeleitungsschweißen

Beim Wärmeleitungsschweißen (Abb. 14 a) wird der Werkstoff nur an der Oberfläche aufgeschmolzen. Es entstehen Schweißnähte von einigen Zehntel Millimetern Tiefe.

Dieses Verfahren ist hauptsächlich beim Schweißen mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser gebräuchlich [49].

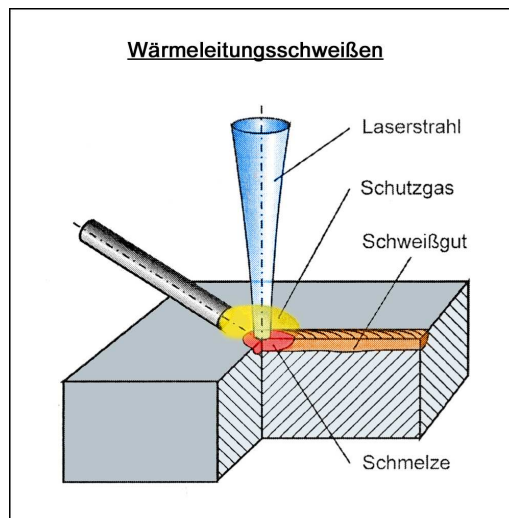


Abb. 14 a: Wärmeleitungsschweißen

Die Nd:YAG-Laserquelle ist für diese Anwendung überaus geeignet, da sich die Energieeinkbringung sehr präzise auf das Notwendigste reduzieren lässt, was wiederum einen wichtigen Aspekt für die Wirtschaftlichkeit darstellt.

#### 4.3.4.2 Das Tiefschweißen

Beim Tiefschweißen (Abb. 14 b) entstehen dagegen sehr tiefe und sehr schmale Nähte. Tiefgeschweißt wird mit CO<sub>2</sub>-Lasern und mit Nd-YAG-Lasern im cw-Betrieb, beispielsweise bei der Fertigung von Profilen und Getriebeteilen und beim Bearbeiten großer Blechdicken.

Bei ausreichend hoher Energiedichte erhitzt der Laserstrahl an der Schweißstelle den Werkstoff so stark, dass dieser an der Oberfläche des Werkstückes verdampft. Durch das Verdampfen des Werkstoffes und den Druck des abströmenden Metaldampfes bildet sich in der Tiefe des Werkstoffes eine Dampfkapillare, das sog. „keyhole“. Der verdampfte Werkstoff absorbiert Laserenergie und wird dadurch ionisiert. Es entsteht laserinduziertes Plasma.

Der Durchmesser des Dampfkanals entspricht etwa dem Durchmesser des fokussierten Laserstrahles, seine Tiefe richtet sich nach Fokussierbedingungen und der Strahlleistung. Durch eine Relativbewegung von Laserstrahl und Werkstück bewegt sich der Dampfkanal entlang der Fugelinie des zu schweißenden Teiles, wodurch sich eine Schweißverbindung ausbildet. Der Werkstoff schmilzt dabei vor dem Kanal auf, umströmt diesen und verbindet die Fügeteile beim Wiedererstarren. Ein effizientes Schweißen ist nur im Leistungsdichtebereich zwischen Einsetzen des Tiefschweißeffektes ( $I > 10^6 \text{ W/cm}^2$ ) und dem Auftreten von Plasma ( $I < 10^7 \text{ W/cm}^2$ ) möglich. Nach oben lässt sich dieser Bereich durch den Einsatz eines Arbeitsgases erweitern, das in der Lage ist, eine Plasmabildung zu verhindern bzw. ein entstehendes Plasma so dünn und „kühl“ zu halten, dass die Verluste gering sind. Als solches Gas hat sich Helium bewährt [53].

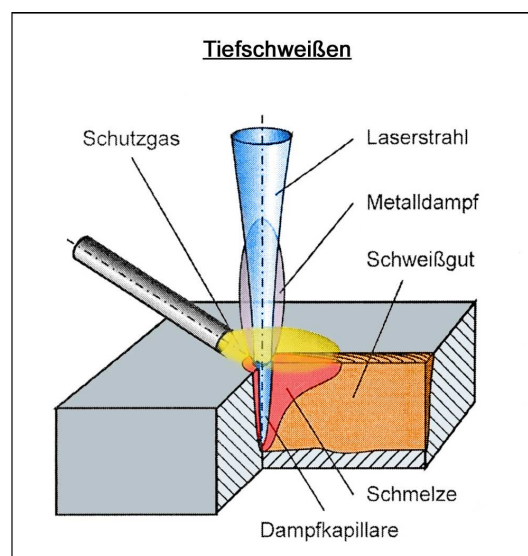


Abb. 14 b: Tiefschweißen



Da bei Erstarrung der Schmelze das Nahtgefüge nicht dem des Grundwerkstoffes entspricht, ist es wichtig, die Wärmeeinflusszone möglichst klein zu halten. Die hohe Energiekonzentration des Laserstrahles, die bis auf eine Punktgröße von 0,1 mm konzentriert werden kann, wird vorteilhaft dazu genutzt, mit vergleichsweise geringer Energieeinbringung eine hochwertige Schweißverbindung mit schlanker Nahtgeometrie zu erzeugen. Ohne Nacharbeitung lassen sich Wurzelüberhöhungen kleiner als 0,15 mm prozesssicher erreichen; in der Regel liegen sie unter 0,1 mm.

#### **4.3.4.3 Tiefschweißen mit Zusatzwerkstoffen**

Beträgt die Spaltbreite mehr als 5 % der Schweißtiefe, kann die Schmelze den Abstand zwischen den Werkstücken nicht mehr vollständig überbrücken. Nahteinfall oder Anbindungsfehler wären die Folge. In diesem Fall ist ein Zusatzwerkstoff erforderlich, der während des Schweißprozesses als Draht zugeführt wird. Die benötigte Menge des Drahtes ist abhängig von der Schweißgeschwindigkeit, der Spaltbreite und der Schweißtiefe. Da der Zusatzdraht sehr dünn ist (etwa 0,8 bis 1,2 mm) ist eine exakte Positionierung und auch Dosierung erforderlich. Durch geeignete Wahl des Zusatzdrahtes kann außerdem eine Umlegierung der Fügestelle vorgenommen werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, einer Rissbildung der Schweißnaht vorzubeugen [46].

#### **4.3.5 Vor- und Nachteile des Laserschweißprozesses**

##### **Vorteile**

- hohe Leistungsdichte → hohe Arbeitsgeschwindigkeit
- die geringe Streckenenergie führt zu einer schmalen Wärmeeinflusszone
- berührungslose Energieübertragung
- es entstehen sehr schlanke Nahtgeometrien mit einem großen Tiefe-Breiten-Verhältnis
- geringe thermische Belastung → minimaler Verzug
- geringe Schädigung des Korrosionsschutzüberzugs
- hohe Reproduzierbarkeit und Einhaltung enger Toleranzen
- gute Steuerbarkeit des Laserstrahls → leichte Automatisierbarkeit der Fertigungsverfahren
- schwer zugängliche Bereiche innerhalb des Werkstücks sind gut zu erreichen
- gleichmäßige Schweißnahtoberfläche → wenig Nacharbeit, da nur geringe Spritzerbildung



#### Nachteile

- hohe Anforderungen an die Kantenvorbereitung und das Spannwerkzeug
- hohe Abkühlgeschwindigkeit kann zu einer erhöhten Aufhärtung des Werkstoffes führen
- hohe Anlagenkosten → hohe Investitionen
- hoher Aufwand für Sicherheitstechnik

## 4.4 Das Laser-Lichtbogen-Hybridschweißverfahren

Bei der mit dem Begriff „Laser-Lichtbogen-Hybridschweißen“ bezeichneten Variante wirken Laserstrahl und Lichtbogen zeitgleich in einer Prozesszone und beeinflussen oder unterstützen sich gegenseitig. Für den industriellen Einsatz bieten sich verschiedene Hybridschweißverfahren an. Es werden hierbei in Abhängigkeit von der zum Einsatz kommenden Strahlquelle im Wesentlichen Hybridschweißverfahren mit dem CO<sub>2</sub>-Laserstrahl bzw. mit dem Nd:YAG-Laserstrahl unterschieden. Durch Koppelung eines dieser Laserschweißprozesse mit einem Lichtbogenschweißprozess (Plasmalichtbogen, WIG-Lichtbogen oder MSG-Lichtbogen), der schleppend (vor dem Laser) oder stechend (hinter dem Laser) angeordnet werden kann, ergeben sich zahlreiche Verfahrenvarianten. Erste Versuche, die beiden Verfahren zu einem Prozess zu vereinen, gehen in die 1980er Jahre zurück. Die damaligen hohen Kosten der Laserenergiequellen verhinderten einen Durchbruch bei der Einführung dieser neuartigen Technologie in die Industrie. Weiterentwicklungen und eine breite Anwendung der Laserstrahltechnologie ließen die Anschaffungskosten der Laserlichtquellen erheblich sinken. Aus weiteren Entwicklungen und Forschungen auf diesem Gebiet zeigten Einsatzgebiete des Verfahrens und ließen die zum Laser-MSG-Hybridschweißen benötigten Komponenten für den Einsatz in der Industrie heranreifen [9].

### 4.4.1 Verfahrensbeschreibung und Prozessgrundlagen

Beim Metall-Schutzgasschweißen wird zwischen einer kontinuierlich zugeführten Draht-Elektrode und dem Werkstück ein Lichtbogen erzeugt, der in einer Schutzgasatmosphäre die Drahtelektrode ab- und das Bauteil aufschmilzt. Beim Hybridprozess werden der Laser- und der MSG-Prozess in einer gemeinsamen Zone wirksam. Der Laserstrahl ist für den Materialtransport in die Tiefe verantwortlich, während dem Lichtbogen die Aufgabe zukommt, der Prozesszone den Zusatzwerkstoff in aufgeschmolzener Form zuzuführen. Damit kommen die Vorteile der Einzelverfahren zur Geltung, wobei sich die Verfahren auch gegenseitig positiv beeinflussen und unterstützen und die Nachteile der jeweils einzelnen Prozesse kompensieren bzw. minimieren. Die Zielsetzung sind größere Einschweißtiefe und höhere Schweißgeschwindigkeiten sowie metallurgisch günstigere Bedingungen, als sie mit dem jeweils al-

lein eingesetzten Verfahren erzielt werden können. Die Einschweißtiefe wird in erster Linie durch die Laserstrahlleistung und -formung bestimmt, die Nahtbreite in erster Linie durch den Lichtbogen, vor allem der Lichtbogen Spannung. Ebenfalls konnte eine Steigerung bis hin zu einer Verdoppelung der beim reinen Laserstrahlschweißverfahren erreichten Geschwindigkeit verzeichnet werden. Die Anwendung eines stabilen Prozesses als Grundlage weiterer Untersuchungen gelang in jüngster Zeit dank der höheren verfügbaren Ausgangsleistung der Laser sowie der verbesserten Steuerungstechnik der Stromquelle. Verschiedene Untersuchungen haben sich bisher mit den Prozessgrundlagen von Laser-Lichtbogen-Hybridschweißverfahren beschäftigt. Aufgrund der nachgewiesenen Vorteile findet diese Technik verstärkte industrielle Anwendung in zahlreichen Branchen. Auch einigen Industriezweigen, denen die Anwendung der Laserstrahltechnik aufgrund erschwerter Rahmenbedingungen (breite Fügespalte oder große Toleranzen) bisher nicht möglich war, erlaubt die Hybridschweißtechnik eine Nutzung der sich dadurch ergebenden spezifischen Vorteile. Untersuchungen haben ergeben, dass der Lichtbogenprozess aufgrund seines breiten Wirkungsbereiches zu einer Vergrößerung des Nahtvolumens führt, so dass Fügespalte besser überbrückt werden können. Dieser Vorteil erlaubt Anwendungen, die mit der reinen Laserschweißtechnik bisher ausgeschlossen waren.

Durch die kombinierte Wirkung von beispielsweise CO<sub>2</sub>-Laserstrahl und MSG-Lichtbogen kann eine verbesserte Spaltüberbrückbarkeit in Verbindung mit einer variablen Nahtgeometrie sowie eine höhere Prozessstabilität und -geschwindigkeit erreicht werden.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass bei den Hybridprozessen i. d. R. die Vorteile der Einzelverfahren erhalten bleiben bzw. erhöht werden, während die jeweiligen Nachteile eine deutliche Minderung erfahren.

In Abbildung 15 ist der schematische Aufbau des Laser-MSG-Hybridschweißprozesses dargestellt. Beide Schweißverfahren werden in einer Öse zusammengeführt und als ein Verfahren weiter geführt.

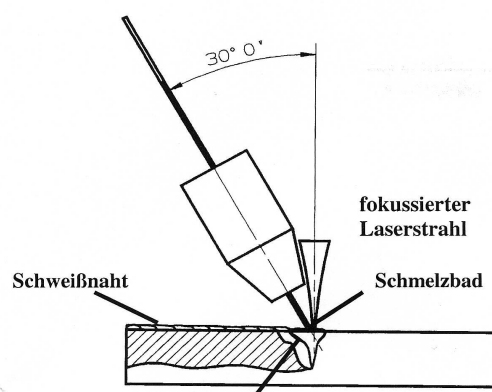


Abb. 15: Schematische Darstellung Hybridschweißverfahren

Zur Zusammenführung der beiden Schweißprozesse ist ein entsprechend angepasster Bearbeitungskopf, der alle benötigten Komponenten in geeigneter Form integriert, erforderlich.

Der hierbei verwendete Lichtbogen im MSG-Prozess kombiniert mit der großen Einschweißtiefe des Lasers führt zu einer breiten Schweißnaht-Oberraupe bei gleichzeitig nur geringfügiger Nahtüberhöhung. Insgesamt bestimmt das Verhältnis der Leistungsbeiträge der Energiequellen den Lichtbogencharakter, die Form des Einbrands sowie die Optik der Naht. Während beim Laserstrahlschweißen zumeist parallele Nähte mit hohem Aspektverhältnis erzeugt werden, ist insbesondere der obere Teil von hybridgeschweißten Nähten pilz- oder kelchförmig aufgeweitet (Abb. 16 a) und b).

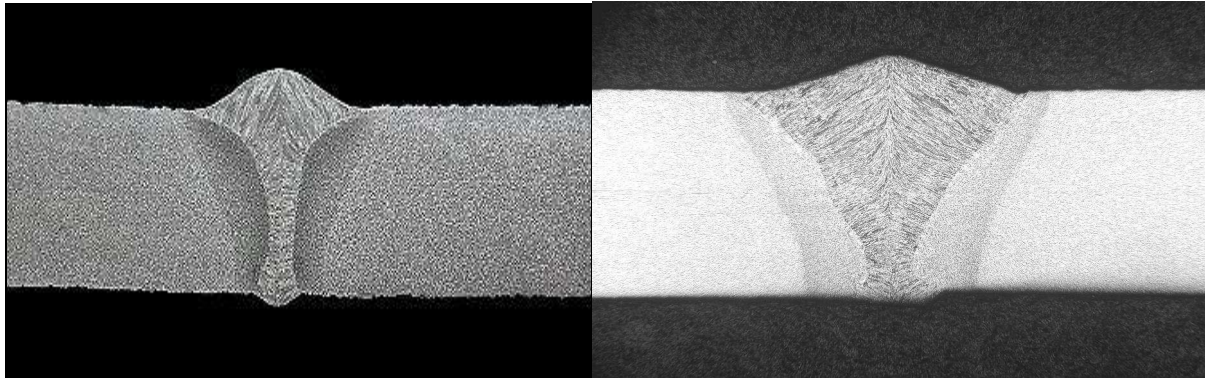


Bild a)

Bild b)

Abb. 16 a) und b) Schliffbilder von Laser-MSG-Hybridschweißnähten [SLV M-V GmbH]

Schliffbilder einer mit dem Laser-MSG-Schweißverfahren geschweißten Naht zeigen eine Vermischung der typischen Wirkweisen beider Verfahren auf. Es ergibt sich ein den Anforderungen entsprechendes Nahtbild. Die getrennte Parametrisierung der Prozesse bleibt erhalten [8], [5].

#### 4.4.2 Vor- und Nachteile des Laser-MSG-Hybridschweißprozesses

Vorteile des Laser-MSG-Hybridschweißverfahren im Vergleich zum reinen Laserstrahlschweißen:

- Unempfindlichkeit gegenüber Werkstücktoleranzen, da aufgrund der guten Spaltüberbrückbarkeit die Investitionskosten in der Vorfertigung und in aufwendige Werkzeuge sinken. Die Prozessabdeckung des Lichtbogens ist breiter als die des Lasers. Damit erhöht sich die Toleranzverträglichkeit zusätzlich.
- Gegenüber den jeweiligen Einzelverfahren werden Einbrandgeometrie, Spaltüberbrückung, Schweißgeschwindigkeit, Streckenenergie und die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißnaht optimiert. Durch die Beeinflussung der Oberfläche durch den Lichtbogen erhöht sich der Absorptionsgrad, womit bei

gleichen Laserparametern die gleiche Einschweißtiefe bei höheren Schweißgeschwindigkeiten möglich wird.

- Durch den geringeren Wärmeeintrag eignet sich das Laser-Hybrid-Verfahren insbesondere für die Verarbeitung höherfester Stähle. Mit Einbußen an Festigkeit und Wärmeverzug ist weniger zu rechnen [8].

#### **4.4.3 Nutzung weiterer hybrider Prozesse**

Die Entwicklung und der Einsatz von hybriden Prozessen in Verbindung mit den Laserstrahlschweißprozessen ist nicht nur auf die vorgenannten Verfahren beschränkt. Zum Beispiel lassen sich mit Hilfe der prozessintegrierten, induktiven Wärmebehandlung die Abkühlbedingungen beim Laserschweißprozess insbesondere für aufhärtungsanfällige Werkstoffe positiv beeinflussen. Durch die Integration der induktiven Erwärmung werden die lasertypischen Vorteile wie kurze Taktzeiten, geringe thermische Belastung der Werkstücke, feindisperse Erstarrungs- und Umwandlungsstrukturen und geringe Wärmedehnung nicht gemindert. Um die unter den Abkühlbedingungen entstehenden Effekte der hohen Zugeigenspannungen und insbesondere bei höherfesten Stählen auch der auftretenden Risse entgegenzuwirken, wird die induktive Erwärmung der Werkstücke eingesetzt, die sich gut in den Laserbearbeitungsprozess integrieren lässt [1]. Der Vorgang einer prozessintegrierten Wärmebehandlung wird in Kapitel 5.1 gesondert beschrieben.

#### **4.4.4 Vorgänge in der Wärmeeinflusszone (WEZ)**

Die konzentrierte Energieeinbringung beim Schweißen führt zu einer Aufschmelzung des Grundwerkstoffs und ggf. eines Zusatzwerkstoffs an der zu verschweißenden Stelle und zwingt den angrenzenden Grundwerkstoff, der als Wärmeeinflusszone (WEZ) bezeichnet wird, zu einer inhomogenen und zeitlich veränderlichen Temperaturverteilung. Das Ausmaß der metallurgischen Vorgänge und damit der resultierenden Eigenschaften im Schweißgut und den zwei schmelzgrenznahen Bereichen der WEZ bestimmen die Güte einer Schweißverbindung.

Beim Laserschweißverfahren wird der Grundwerkstoff teilweise aufgeschmolzen und bildet zusammen mit dem Zusatzwerkstoff die Schmelzzone der Schweißnaht. Der Grundwerkstoff neben der Schmelzzone wird den schweißtypischen Temperaturzyklen mit steilem Anstieg bis nahe der Schmelztemperatur und anschließendem flachem Abfall unterworfen. Damit werden in der Umgebung der Schmelzzone zonenweise unterschiedliche Gefügezustände erzeugt, welche das Gebiet der WEZ bestimmen. Die Eigenschaften der Wärmeeinflusszo-

nen von Schmelzschweißverbindungen und jede hier stattfindende Werkstoffveränderung werden im Wesentlichen von folgenden Faktoren bestimmt:

- Schweißparameter
- Werkstückabmessung
- Geometrie der Nahtform
- Eigenspannungszustand
- Chemische Zusammensetzung

Je nach erreichter Maximaltemperatur wird die WEZ für Stahlwerkstoffe in 5 verschiedene Zonen aufgeteilt.

Zone 1: Partiiell aufgeschmolzene Zone

Die unmittelbar an die Schmelzgrenze anschließende Zone wird unvollständig aufgeschmolzen. Die Breite dieser Zone beträgt nur einige hundertstel Milimeter.

Zone 2: Grobkorn- und Überhitzungszone

Bei Temperaturen im Bereich  $T \gg A_{c3}$  Austenitisierungstemperatur ( $A_{c3}$ ) bildet sich aufgrund der hohen Spitzentemperatur ein sehr grobkörniges Gefüge. In dieser Zone werden Temperaturen bis etwa 1450 °C erreicht. Es bildet sich ein extrem grobkörniges Gefüge aus. Da mit zunehmender Korngröße die volumenbezogene Korngrenzenfläche abnimmt, ist die Inkubationszeit zur Ferritbildung zu längeren Zeiten hin verschoben, so dass die Bildung von Zwischenstufengefüge und Martensit, bedingt durch die Abkühlgeschwindigkeit und den Kohlenstoffgehalt des Stahles, begünstigt wird. Die mit dem Kornwachstum verbundenen Eigenschaftsänderungen sind ein direkter Maßstab für die Schweißeignung des Stahles. Die Grobkornzone kann durch schlechte mechanische Eigenschaften gekennzeichnet sein. Die unter anderem daraus resultierende Härtesteigerung ist mit einer reduzierten Zähigkeit verbunden und führt zu einer verstärkten Neigung zur Kaltrissbildung. Die Grobkorn- und Überhitzungszone stellt den kritischen Bereich innerhalb der WEZ dar.

Zone 3: Feinkorn- und Normalisierungszone

Bei Temperaturen die geringfügig über  $A_{c3}$  liegen (Feinkornzone), werden Bedingungen erfüllt, die einer Normalisierungsglühung entsprechen. Das Austenitkornwachstum wird aufgrund der unvollständig aufgelösten Ausscheidungen unterbunden und es entsteht feinkörniger Austenit. Bei der Rückumwandlung entsteht die Feinkornzone, die in der Regel gute Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften aufweist. Bei schneller Abkühlung kann es jedoch ebenfalls zu einer Härtesteigerung kommen.

Zone 4: Teilaustenitisierte Zone

Dies ist die Zone des teilweisen oder unvollständigen Umkristallisierens. Hier liegen die Temperaturen zwischen  $A_{c1}$  und  $A_{c3}$ . Es kommt damit zum „Perlitzerfall“. Die Vorgänge in diesem Bereich hängen sehr stark von den Aufheiz- und Abkühlungsbedingungen ab.

Zone 5: Anlasszone

Diese Zone geht fließend in den Bereich des unbeeinflussten Grundwerkstoffs über. Die Temperaturen liegen nur noch um die  $A_{c1}$ -Linie und darunter. Änderungen des Gefüges treten hier kaum mehr auf. Bei bestimmten Stählen können jedoch noch Anlasseffekte, Perliteinformung oder künstliche Alterung auftreten [37].

Maßgeblich wird das Temperaturfeld durch die vorgenannten Faktoren bestimmt. Die eingebrachte Wärme ist je nach Schweißverfahren unterschiedlich und beeinflusst den Temperaturverlauf sowie die Breite der WEZ und ist die Ursache für Schweißeigenspannungen und Schweißverzug.

## 5 Die Beeinflussung und Behandlung der Schweißnaht

Je nach angewendetem Schweißverfahren umfasst das Behandeln der Schweißnaht folgende Schritte:

- das Säubern der Naht (mechanisch oder chemisch),
- das Bearbeiten der Naht (durch vorzugsweise schleifen, um Spannungsspitzen im Nahtbereich infolge Kerbwirkung abzubauen),
- das Richten der Bauteile (mechanisch oder thermisch) und
- das Wärmebehandeln in Verbindung mit dem Schweißen (Glühen, Härten, Vergüten).

Besonders wichtig für die Schweißnaht einschließlich der Wärmeeinflusszone ist das Normalisieren, d. h. das Umwandeln von grobkörnigem in feinkörniges Gefüge, um damit eine zähere Schweißverbindung zu erzielen [25]. Vor dem Schweißen wird in der Regel nur normal- oder spannungsarm gegläut (Abb. 17), um eine für das Schweißen günstige Ausgangssituation zu erhalten. Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Stähle hängen weitgehend von der Wärmebehandlung zum Abschluss der Fügeverfahren ab. Die geeignete Wärmebehandlung richtet sich jeweils nach der Stahlsorte, der Werkstückgeometrie und dem angestrebten Ziel.

Die spezifische Wärmebehandlung der martensitischen Stähle besteht aus einer Abkühlung von hoher Temperatur (Härten) und anschließendem Anlassen (Vergüten) (Abb. 17). Nach dem Abschrecken ist der Stahl sehr hart und besitzt innere Gefügeverspannungen, die Härteverzug, Härterisse und vorzeitigen Spröbruch bewirken können. Um diese Versprödung zu verhindern, werden die Bauteile auf Anlasstemperatur erwärmt, eine Zeitlang auf Temperatur gehalten und anschließend langsam abgekühlt. Bei unlegierten und niedrig legierten Stählen beträgt die Anlasstemperatur 200°C bis 300°C, bei hoch legierten Stählen 500°C bis 650°C. Diese Wärmebehandlung verleiht den Werkstücken Festigkeit, eine hohe Streckgrenze sowie Zähigkeit.

Ferritische Stähle werden üblicherweise gegläut, mit dem Ziel, eine Rekristallisation nach einer Kaltverfestigung günstig zu beeinflussen. Rein ferritische Stähle sind aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehaltes nicht härtbar.

Das Lösungsglühen dient der Kaltverformung eines Werkstücks und der Wiederherstellung des ursprünglichen Gefügezustands. Dieses Glühverfahren eignet sich besonders für austenitische Stähle und findet bei Temperaturen zwischen 1.020 und 1.080°C statt. Erst dieser Zustand verleiht den austenitischen Stählen ihre besonderen Umformeigenschaften. Durch diese Wärmebehandlung wird keine Härtezunahme wie bei den martensitischen Stählen erreicht [13].

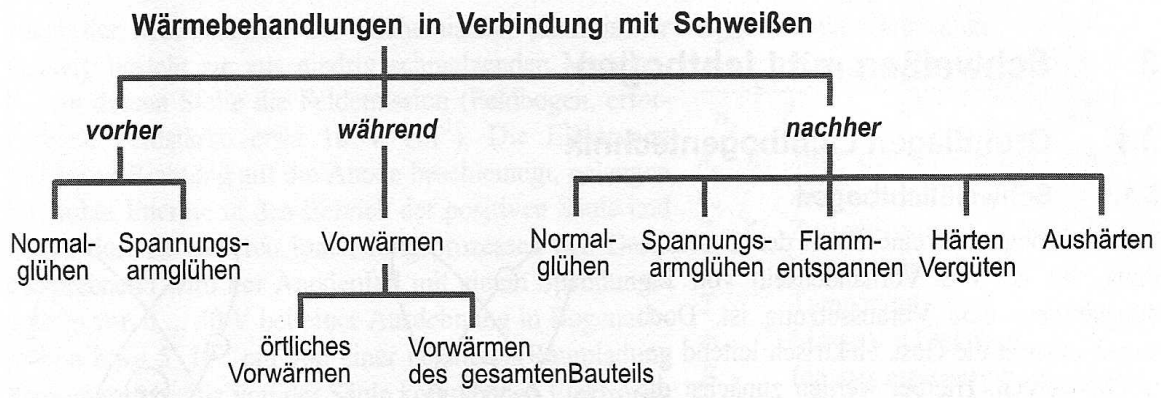


Abb.17: Wärmebehandlungen in Verbindung mit dem Schweißen

## 5.1 Prozessintegrierte induktive Wärmebehandlung

Die Wirkung der Wärmequelle eines Schweißverfahrens und der daraus resultierende typische Temperatur-Zeit-Verlauf führt während des Schweißens zu metallurgischen Veränderungen, die die physikalischen und im Wesentlichen die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone (WEZ) beeinflussen. Als Folge der beim Laserstrahlschweißen auftretenden großen Temperaturgradienten und der geringen Austenitisierungsdauer treten oftmals hohe thermische Spannungen in den Werkstoffen auf, die insbesondere bei höherfesten Stählen zu signifikanter Aufhärtung des Schweißnahtbereiches und zur Rissbildung oder unzureichender Duktilität führen. Werden die globalen Auswirkungen von Schweißeigenspannungen betrachtet, spielen die damit verbundenen Formänderungen eine wesentliche Rolle bei der Einhaltung maßgenauer Fertigung und letztendlich für die Gebrauchsfähigkeit der Schweißkonstruktion. Zur Vermeidung von Kaltrissen, wie sie beim Schweißen auftreten können, kann im einfachsten Fall eine konventionelle Ofenvorwärmung des Werkteils vorgenommen werden. Durch die werkstoffabhängige Vorwärmung ( $T = 100 - 350^\circ\text{C}$ ) des gesamten Bauteils wird die Abkühlgeschwindigkeit soweit verringert, dass sich anstelle von Martensit Bainit oder Perlit bildet (Bild 18a). Alleinige Steuergröße ist dabei die Vorwärmtemperatur  $T_{\text{HF}}$  [41].



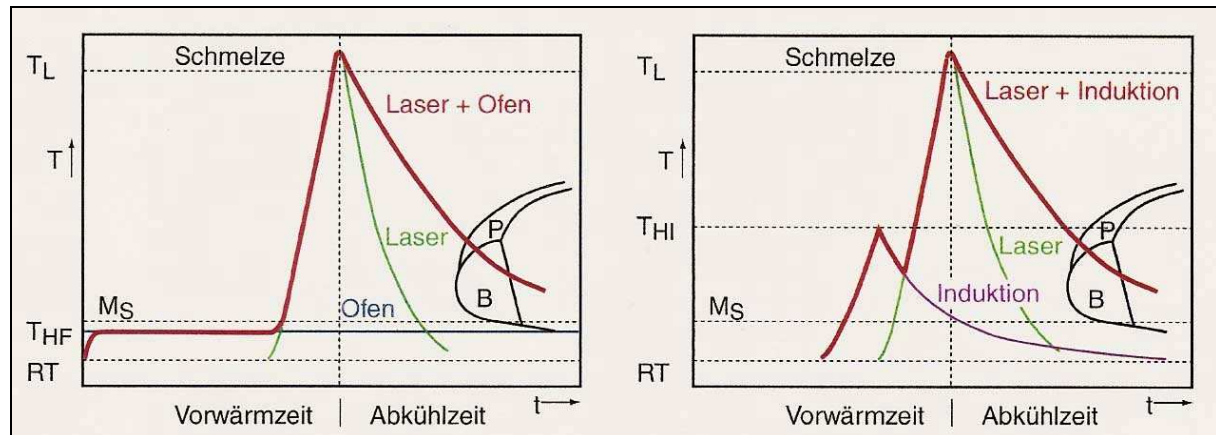


Bild a) Laser + Ofen

Bild b) Laser + Induktion

Abb. 18: Schematische Zeit-Temperaturverläufe unterschiedlicher Vorwärmregimes (EFD).

Den Temperatur-Zeit-Verlauf beim induktiv unterstützten Laserstrahlschweißen zeigt Bild 18b). Dem eigentlichen Temperatur-Zeit-Verlauf des Laserstrahlschweißens ist der taktzeitparallele Kurzzeit-Wärmebehandlungszyklus der induktiven Vorwärmung überlagert. Die induktiv erzeugte Spitzentemperatur  $T_{HI}$  wird hierbei so gewählt, dass die Abkühlzeit ausreichend groß ist, um die Umwandlung in die Bainit- oder Perlitstufe ablaufen zu lassen. Bedingt durch die drastisch verkürzten Vorwärmzeiten liegt die Spitzentemperatur erheblich über den Temperaturen des konventionellen Vorwärmens. Als Steuergrößen zur Einstellung der Abkühlzeit sind die Parameter Spitzentemperatur zum Vorwärmen, die Vorwärmzeit und ggf. eine Pausenzeit zwischen Vorwärmen und Schweißen verfügbar [41].

Die im Stahlbau in Verbindung mit dem Schweißen konventionell angewendeten Wärmebehandlungen (Ofenwärmung) von massiven, kompletten Bauteilen sind bei Feinblechplatten aus metallurgischen und wirtschaftlichen Gründen häufig nicht durchführbar, da sie unerwünschte Veränderungen der spezifischen Eigenschaften der Stahlbleche zur Folge hätten. Die Wärmeeinbringung ist daher zu minimieren. Eine lokale Wärmenachbehandlung der Schweißnaht durch eine dem Laserprozess angepasste Zusatzenergiequelle mit hoher örtlicher Auflösung ist eine praktikable Möglichkeit, eine Härteminderung und Duktilitätssteigerung durch Verlängerung der Abkühlzeit oder Anlassen des Schweißnahtgefüges zu erreichen. Durch den Einsatz der gut steuer- und integrierbaren Methode der Induktionserwärmung kann der Werkstoff auch bei größeren Blechstärken über seine gesamte Dicke verhältnismäßig gleichmäßig erwärmt werden. Dies hat im Vergleich zur Energieeinbringung über die Bauteiloberfläche den Vorteil, dass wesentlich größere Erwärmungsleistungen zum Einsatz kommen können, ohne dass diese durch ein Aufschmelzen der Oberfläche limitiert sind. Dadurch werden kürzere Taktzeiten bzw. höhere Prozessgeschwindigkeiten erreicht. Untersuchungen zur Verbesserung der Umformeigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Tailored Blanks haben gezeigt, dass durch den Einsatz einer seriellen, induktiven Wärmebehandlung deutliche Verbesserungen der Nahtduktilität erzielt werden kann [28].

In Abb. 19 ist der Aufbau einer Laser-Induktions-Hybridanlage als Schemazeichnung dargestellt. Die Anlage besteht aus einem Laser mit Strahlführung und -formung, Generator mit Induktor sowie eine Führungsmaschine. Als Strahlquellen können hierbei sowohl CO<sub>2</sub>-, Nd:YAG- und in neuerer Zeit auch Dioden-Laser eingesetzt werden. In Abhängigkeit des verwendeten Lasertyps erfolgt die Strahlführung über Kupferspiegel oder Lichtleitkabel. Die Strahlformung kann mit Hilfe von Linsen und Spiegeln erfolgen. Eine Ausnahme bildet hier der Dioden-Laser, welcher aufgrund seiner geringen Baugröße auch direkt in die Führungsmaschine integrierbar ist. Induktionsseitig ist es möglich, eine Vielzahl von hinsichtlich Leistung und Frequenz auf die Bearbeitungsaufgabe angepasste Generatoren einzusetzen. Als Führungsmaschinen kommen sowohl Mehrachsen-CNC-Anlagen als auch Roboter in Frage. [41].

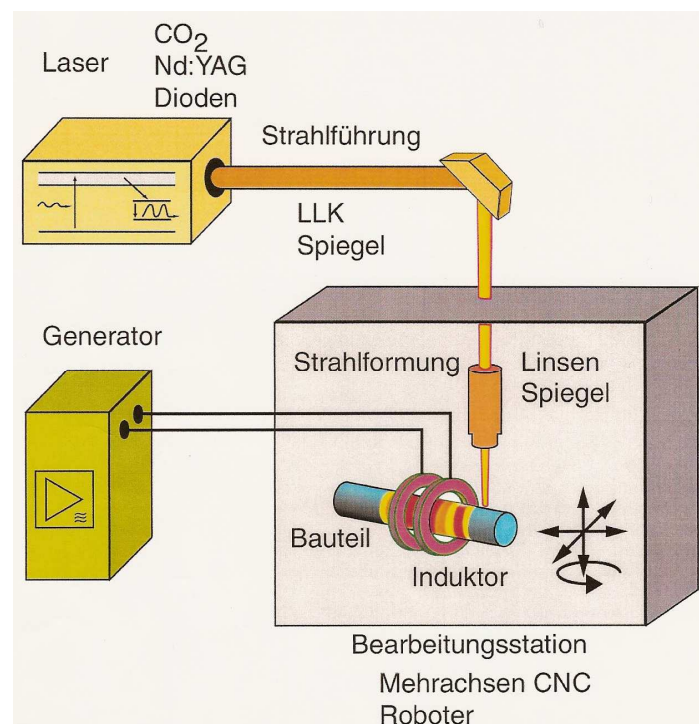


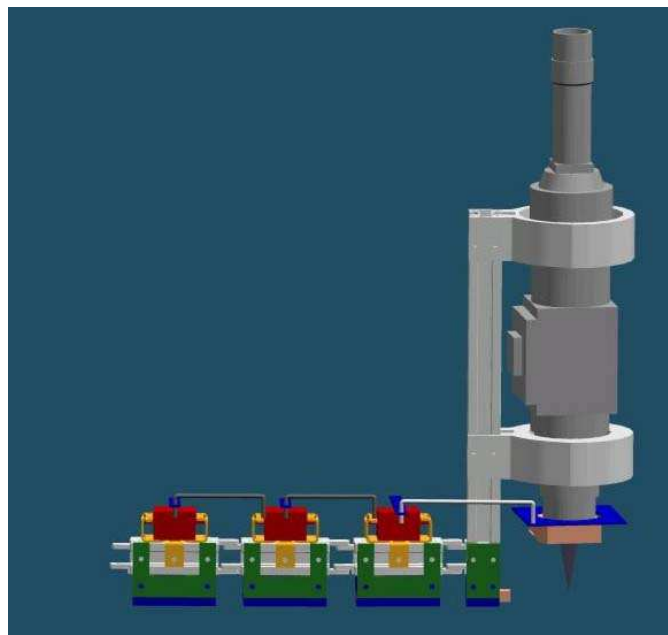
Abb. 19: Schema einer Laser-Induktions-Hybridanlage (EFD)

Weitere Wärmequellen sind z. B. ein Laserstrahl- sowie eine Mikroplasmaquelle. Hierbei wird die Wärme über die Werkstoffoberfläche zugeführt. Die thermische Beeinflussung tiefer liegender Bereiche erfolgt ausschließlich über Wärmeleitung. Mit diesen Verfahren ist zwar ein sehr präzises Erwärmen möglich, die erzielbaren Einwirktiefen sowie die Prozessgeschwindigkeiten sind jedoch begrenzt [28].

Auch durch eine induktive Vorerwärmung kann ein Prozessvorteil entstehen. Die Anhebung des Materials auf ein erhöhtes Temperaturniveau führt zu einer Reduzierung der benötigten Laserstrahlenergie. Zum Beispiel lässt sich dadurch bei gleicher Laserenergie die Prozessgeschwindigkeit erhöhen. Dies betrifft in aller Regel dickwandige Bauteile. Die Vordeponierung einer entsprechenden Wärmemenge im Bauteil ist bei der schweißtechnischen Verar-

beitung von Feinblechen jedoch nicht möglich, da diese zu einer Verschlechterung der Eigenschaften hochfester Mehrphasenstähle führen würde. Eine Angleichung der Schweißnahteigenschaften an den Grundwerkstoff wird in diesem Falle nur durch eine nachträgliche Wärmebehandlung erreicht [28].

In jüngeren Forschungsarbeiten ist es gelungen, die Vorteile der in den Schweißprozess integrierten induktiven Nachwärmung linearer Bauteile aus hochfesten Stahlwerkstoffen auf nicht lineare Nähte von Tailored Blanks zu übertragen. Dies wurde mit der Entwicklung eines dreiteiligen Induktors erreicht, der flexibel dem zweidimensionalen Nahtverlauf folgen kann. Er wird mit Hilfe einer Matrize mechanisch über die Schweißnaht geführt und hat einen Bewegungsradius von 90°. Mit diesem flexiblen Induktor (Abb. 20) konnten bisher maximale Vorschubgeschwindigkeiten von 3 m/min erreicht werden. Weitere Untersuchungen und Forschungsarbeiten sollen dazu beitragen, die Prozessgeschwindigkeiten für die Anforderungen in industriellen Einsatzbereichen zu optimieren [6].



*Abb. 20: Segmentierter Induktor im Modell mit Laserbearbeitungskopf (LZH)*

## 6 Allgemeine Schweißbarkeit von Stählen

Die Abschätzung der Schweißeignung bei Stählen erfolgt nach Stahlgruppen, die entsprechend ihrer Legierungsgehalten in

- unlegierte
- niedrig legierte
- hochlegierte Stähle

eingeteilt werden.

Unlegierte Stähle sind Eisen- und Kohlenstoff-Legierungen, deren Begleit- oder Legierungselemente folgende Höchstgrenzen nicht überschreiten:

Si	Mn	Ti	Al	Cu	P	S	
0,5	0,8	0,1	0,1	0,25	0,09	0,06	Gew. %

Tab. 1: Höchstgrenzen der Begleit- oder Legierungselemente unlegierter Stähle

Der Kohlenstoffgehalt ist für die Eigenschaften dieser Stähle bestimmend. Die Bezeichnung erfolgt durch das Symbol C und eine Zahl, die dem 100-fachen des C-Gehaltes entspricht [23].

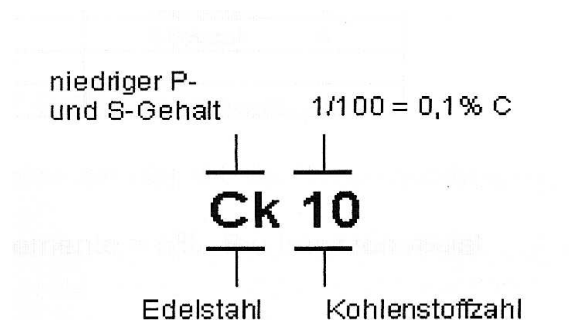


Abb. 21: Normbezeichnung für einen unlegierten Stahl

Niedrig legierte Stähle sind Stähle mit einem Mn-Gehalt  $>1\%$  und legierte Stähle mit einem Legierungselementgehalt  $< 5\%$ .

Die Hauptvorteile dieser Stähle sind:

- bessere Härbarkeit bei mildem Abschreckmittel
- höhere Anlassbeständigkeit des gehärteten Werkstoffes
- bessere Durchhärtung

Die Bezeichnung erfolgt mit einer Zahl, die den 100fachen Kohlenstoff-Gehalt angibt, gefolgt von den chemischen Symbolen der Legierungselemente und Zahlen, die in der Reihenfolge der Legierungselemente einen Hinweis auf deren Gehalt geben [23] .

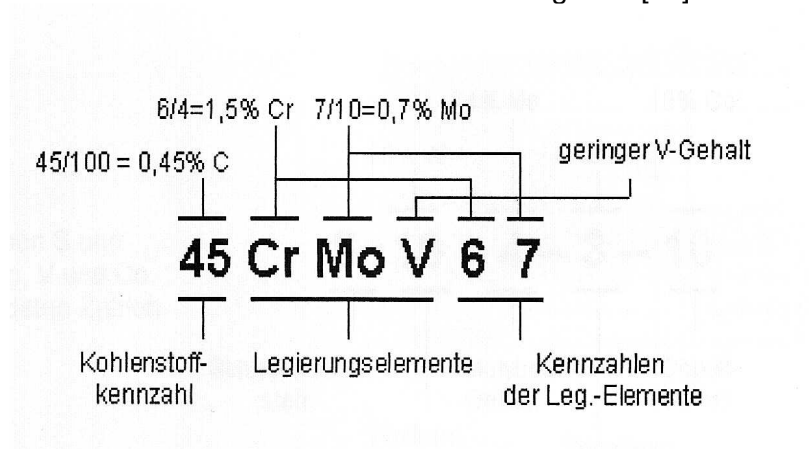


Abb. 22: Normbezeichnung für einen niedrig legierten Stahl

Multiplikatoren für Legierungselemente					
4		10		100	
Chrom	Cr	Aluminium	Al	Kohlenstoff	C
Cobalt	C	Kupfer	Cu	Phosphor	P
Mangan	Mn	Molybdän	Mo	Schwefel	S
Nickel	Ni	Tantal	Ta	Stickstoff	N
Silicium	Si	Titan	Ti		
Wolfram	W	Vanadium	V		

Tab. 2: Legierungselemente

Bei hochlegierten Stählen ist die Summe aller Legierungselemente >5 %. Sie besitzen meist Sondereigenschaften, wie z. B.

- Rost- und Säurebeständigkeit
- Hitze- und Zunderbeständigkeit
- Hohe Dauerstandsfestigkeit
- Schneidhaltigkeit bei Rotglut
- unmagnetisches Verhalten
- besondere physikalische Eigenschaften

Diese werden gekennzeichnet durch den Buchstaben X, einer Zahl, die dem 100fachen des mittleren C-Gehaltes entspricht, den chemischen Symbolen der den Stahl kennzeichnenden

Legierungselementen, sowie Zahlen, die in der Reihenfolge des Gehaltes der einzelnen Legierungselemente deren Gehalt angeben [23].

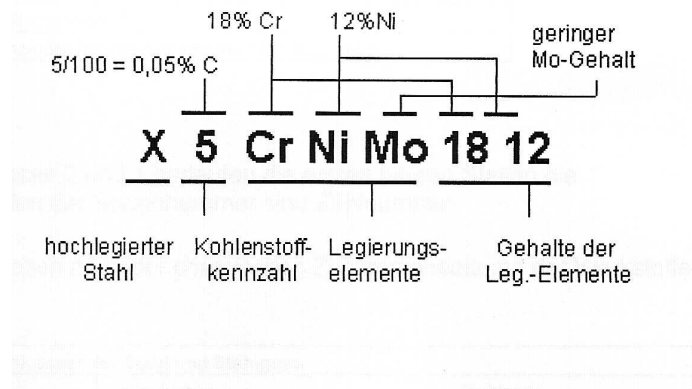


Abb. 23: Normbezeichnung für einen hoch legierten Stahl

Die unlegierten Stähle werden bezüglich ihrer Schweißseignung unterschieden nach dem Kohlenstoffgehalt und der Vergütungsart und die hoch legierten Stähle nach ihren Gefügeanteilen von ferritisch bis austenitisch (Abb. 24). Werkzeugstähle sind wegen ihres hohen Kohlenstoffgehaltes bzw. Karbidanteiles nur bedingt, meist jedoch nicht schweißbar. In Abhängigkeit vom Grad der Erwärmung an der Fugestelle, schmelzflüssiger oder teigiger Zustand, ist zwischen Schmelzschweißseignung und Pressschweißseignung zu unterscheiden [25].

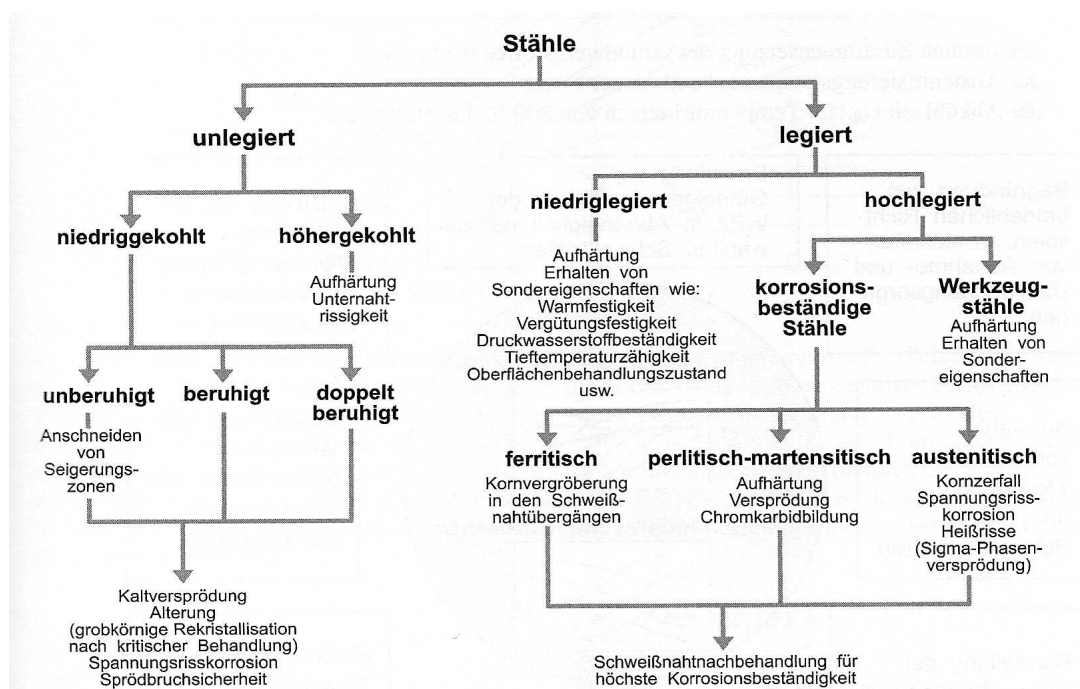


Abb. 24: Werkstoffbesonderheiten bestimmter Stahlgruppen im Hinblick auf das Schweißen

Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt kleiner als 0,24 % eignen sich gut zum Schweißen. Wird der Kohlenstoffgehalt größer, verringert sich die Schweißbarkeit des Werkstücks und wird als „bedingt schweißbar“ eingestuft. Kohlenstoff führt zu einer Aufhärtung der Naht. Dadurch

entstehen Spannungen innerhalb der abkühlenden Schmelze, die letztlich zu Rissen in der Schweißnaht führen können.

In der Praxis hat es sich bewährt, Stähle mit einem mittleren Kohlenstoffanteil (0,25 % bis 0,35 %) vor dem Schweißen vorzuwärmen und/oder das Werkstück mit hoher Streckenenergie zu schweißen. Zusätzlich muss ein langsames Abkühlen der Naht gewährleistet sein.

Stähle mit mehr als 0,35 % Kohlenstoffanteil sind sehr schlecht zu schweißen.

Austenitische Cr-Ni-Stähle sind allgemein gut schweißbar und erlauben wegen ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit höhere Schweißgeschwindigkeiten [50].

Die Schweißbarkeit niedrig legierter Stähle ist gegeben, wenn das Kohlenstoffäquivalent ( $C_{eq}$ )  $\leq 0,4$  % beträgt. Das Kohlenstoffäquivalent wird in Abhängigkeit von den Anteilen der Legierungselemente in Gewichtsprozenten nach folgender Gleichung (1) bestimmt:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

*Gleichung 1) Bestimmung des Kohlenstoffäquivalentes*

Außer Kohlenstoff beeinflussen auch andere Elemente die Aufhärtungsneigung und Gefügeveränderung in der Wärmeeinflusszone. Die Wirkung dieser Elemente lässt sich zahlenmäßig mit dem oben bezeichneten Kohlenstoffäquivalent ( $C_{eq}$ ) darstellen und gibt an, welche Wertigkeit andere Elemente bezogen auf die Wirkung einer gleichgroßen Menge an Kohlenstoff haben. Da in dieser Formel aber weder die metallurgischen Eigenschaften noch die konstruktions- und fertigungsbedingten Gegebenheiten eines Werkstückes berücksichtigt sind, muss eine Aussage aufgrund des Kohlenstoffäquivalents allein stets vorsichtig beurteilt werden [37].

## 7 Umwandlungsverhalten der Stähle beim Schweißen

Bei den meisten technischen Wärmebehandlungen wird der Stahl unmittelbar aus dem Austenitgebiet auf nahezu Raumtemperatur abgeschreckt. Die Austenitumwandlung erfolgt dabei kontinuierlich. Um die Umwandlungsvorgänge beschreiben zu können, sind ZTU-Diagramme notwendig. Hierfür wird bei einer konstanten Abkühlungsgeschwindigkeit Beginn und Ende der Umwandlung durch Messung von physikalischen Größen wie Länge, Volumen, elektrischer Widerstand, Wärmehalt, magnetische Permeabilität und durch metallografische Untersuchungen ermittelt.

Die praktische Bedeutung von ZTU-Schaubildern ist groß. Die mechanischen Eigenschaften von Stählen sind abhängig von der Wärmebehandlung. Aus ZTU-Schaubildern sind die jeweiligen Gefügestände, insbesondere Beginn und Ende der Austenitumwandlung ersichtlich.

S-ZTU-Schaubilder für die modernen hochfesten Stahlwerkstoffe, wie sie für die Herstellung von Tailored Blanks zunehmend eingesetzt werden, sind nicht öffentlich verfügbar. Jedoch können anhand von Diagrammen für Werkstoffe, die ähnliche Zusammensetzungen aufweisen generell Tendenzen abgeleitet werden, die zur Bestimmung ziel führender Möglichkeiten der Prozessführung verwendbar sind.

Nachfolgende Abbildung zeigt das Schweiß-ZTU-Diagramm einer Modell-Legierung mit einer zum höherfesten Feinkornbaustahl H320LA-ähnlichen Zusammensetzung [28].

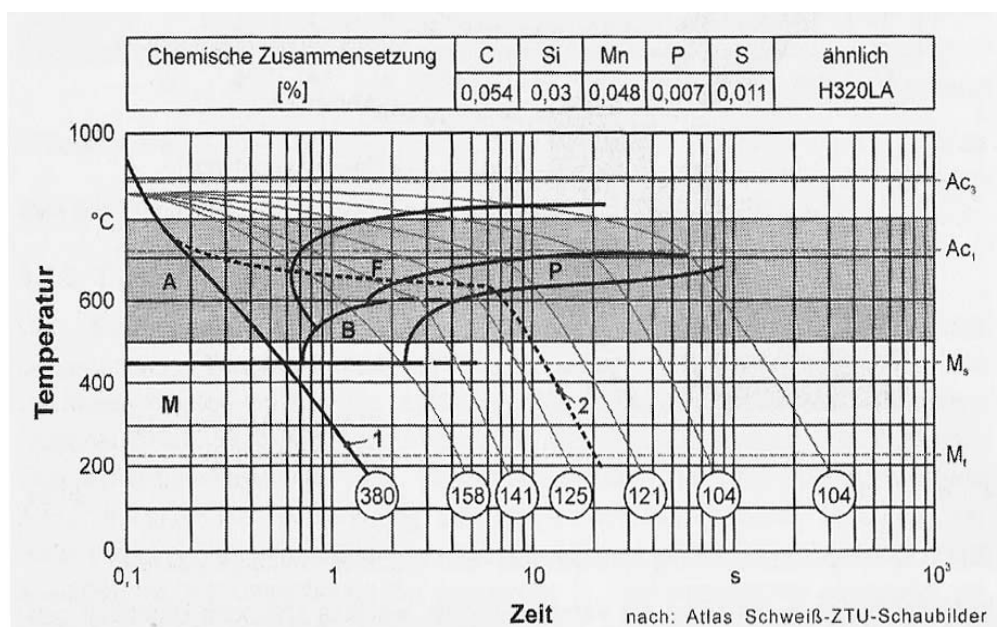


Abb. 25: Schweiß-ZTU-Diagramm eines Modellwerkstoffes [Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder]

Für fast alle Stahllegierungen mit Umwandlungsgefüge wurden von Forschungsinstituten und Stahlherstellern ZTU-Diagramme (Abb. 25) entwickelt und katalogisiert. Für die Erzielung bestimmter Werkstoffeigenschaften kann das dafür in Frage kommende Wärmebehand-



lungsverfahren vorher exakt bestimmt werden. Darüber hinaus wird zwischen U-ZTU-Schaubildern unterschieden, die eine vorausgegangene Umformung mit berücksichtigen und S-ZTU-Schaubildern (Schweiß-ZTU-Schaubilder), die die Temperaturzyklen beim Schweißen mit berücksichtigen. S-ZTU-Diagramme sind dadurch charakterisiert, dass die Proben einem Schweißzyklus mit einer bestimmten Spitzentemperatur (z. B. 1350°C) und unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten im Umwandlungsbereich zwischen 800°C und 500°C unterworfen werden und das Umwandlungsverhalten festgestellt wird. Sie erlauben Aussagen über die Gefügeveränderungen in der Wärmeeinflusszone von Schweißverbindungen infolge des typischen thermischen Schweißzyklus und müssen daher mit den für das Schweißen charakteristischen Austenitisierungsbedingungen aufgenommen werden [29]. Die Austenitkorngröße bestimmt in weiten Bereichen die Geschwindigkeit der Umwandlung, so dass bei verschiedenen Spitzentemperaturen und somit auch Austenitisierungsbedingungen eine Verschiebung der Umwandlungskurven im kontinuierlichen ZTU-Schaubild festzustellen ist. Um diesen Einfluss auf die Gefügestruktur erfassen zu können, wurde das Spitzen-Temperatur-Abkühlzeit-Schaubild (STAZ) (Abb. 26) entwickelt, welches durch Kombination mehrerer SZTU-Schaubilder für unterschiedliche Austenitisierungstemperaturen realisiert wird. Als Koordinaten werden die Austenitspitzentemperatur  $T_{a \max}$  und die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  aufgetragen, die die charakteristische Zeit für die Abkühlung von 800°C auf 500°C wiedergibt. Abb. 26 stellt eine Vereinfachung der Bestimmung von Gefügezusammensetzung und Abkühlzeit unter Berücksichtigung der im Schweißzyklus auftretenden Spitzentemperatur dar. Im unteren Teilbild wird der Punkt der Blechdicke auf der obersten Linie mit dem Punkt der Streckenenergie auf der untersten Linie verbunden. Am Schnittpunkt der Verbindungslinie mit der mittleren Skala wird die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  abgelesen. Ist die Spitzentemperatur im Schweißzyklus bekannt, kann nun aus dem mittleren Teilbild abgelesen werden, in welcher Umwandlungsstufe das Endgefüge entsteht. Ebenfalls wie beim S-ZTU-Schaubild wird beim STAZ-Schaubild die zu erwartende Härte angegeben. Ein Vorteil bei der Ermittlung des Gefüges gegenüber von S-ZTU-Schaubildern besteht darin, dass ein S-ZTU-Schaubild nur für genau eine Spitzentemperatur abgestellt ist und veränderte Spitzentemperaturen nicht berücksichtigt [22]. Ein entscheidender Nachteil des STAZ-Schaubildes zeigt sich in der sehr aufwendigen Ermittlung der Umwandlungslinien, so dass im Allgemeinen lediglich kontinuierliche bzw. S-ZTU-Schaubilder verfügbar sind [30].

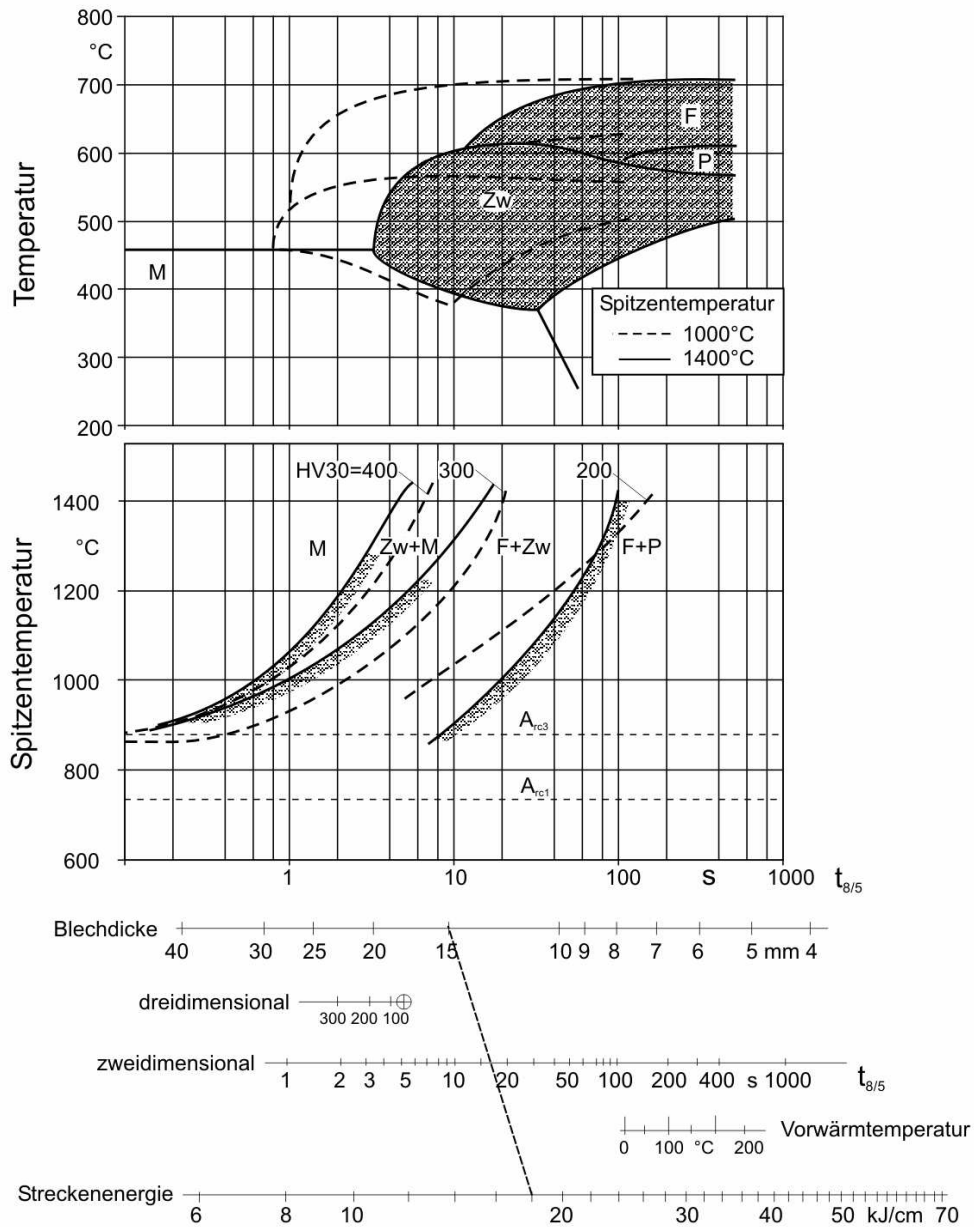


Abb. 26: STAZ-Schaubild zur Ermittlung von  $t_{8/5}$  und Gefüge [22]

## 8 Eingesetzte Werkstoffe für die Herstellung von Tailored Blanks

In den letzten Jahren hat die Entwicklung neuer Werkstoffe seitens der Stahl-, Aluminium- und Magnesiumindustrie durch die hohen Anforderungen des Automobilbaus und der allgemeinen Verkehrstechnik zugenommen. Mit der Entwicklung der konventionellen höher und hochfesten Stählen begann der Einstieg in den Stahlleichtbau. Durch ihre niedrigen Kohlenstoffgehalte und geringe Legierungszugaben wird eine sehr gute Schweißbarkeit erzielt.

Dazu zählen

- IF- Stähle (Interstitial free)
- IH (höherfeste isotrope Stähle)
- BH (Bake-Hardening-Stähle)
- P (Phosphorlegierte Stähle)
- LA (Mikrolegierte Stähle)

Im Bereich der Stahlwerkstoffe wurden darüber hinaus eine Vielzahl an hoch- bis höchstfesten Güten entwickelt, deren Leichtbaupotential auf einer erheblich gesteigerten Festigkeit basiert.

Dazu zählen

- DP (Dualphasen-Stähle)
- CP (Complexphasen-Stähle)
- MS (Martensitphasen-Stähle)
- TRIP/TWIP (Transformation- bzw. Twinning Induced Plasticity-Stähle)
- HSD (High Strength and Ductility-Stähle)
- B (Borlegierte Stähle)

Die Eigenschaften dieser modernen Mehrphasenstähle sind im Kapitel 9) Umformeigenschaften erläutert.

Eine weitere Werkstoffgruppe ist die der Leichtmetalle. Sowohl die Aluminium- als auch die Magnesiumwerkstoffe sind hinsichtlich der Festigkeit und der Verarbeitungseigenschaften erheblich verbessert worden. Verschiedene Projekte der Stahl- und Automobilindustrie haben belegt, dass durch die konsequente Nutzung hochfester Stahlwerkstoffe in Kombination mit dem Einsatz belastungsangepasster Halbzeuge im Karosseriebau eine Gewichtsreduzierung von 25 bis 30 % ohne Mehrkosten erzielt werden kann [28].

Die nachfolgende Abbildung 27 gibt einen Überblick über die verwendeten Werkstoffe im Automobilbau aus den Anfängen ihrer Entwicklung Mitte der 1970er Jahre mit einer Prognose bis in das Jahr 2010:

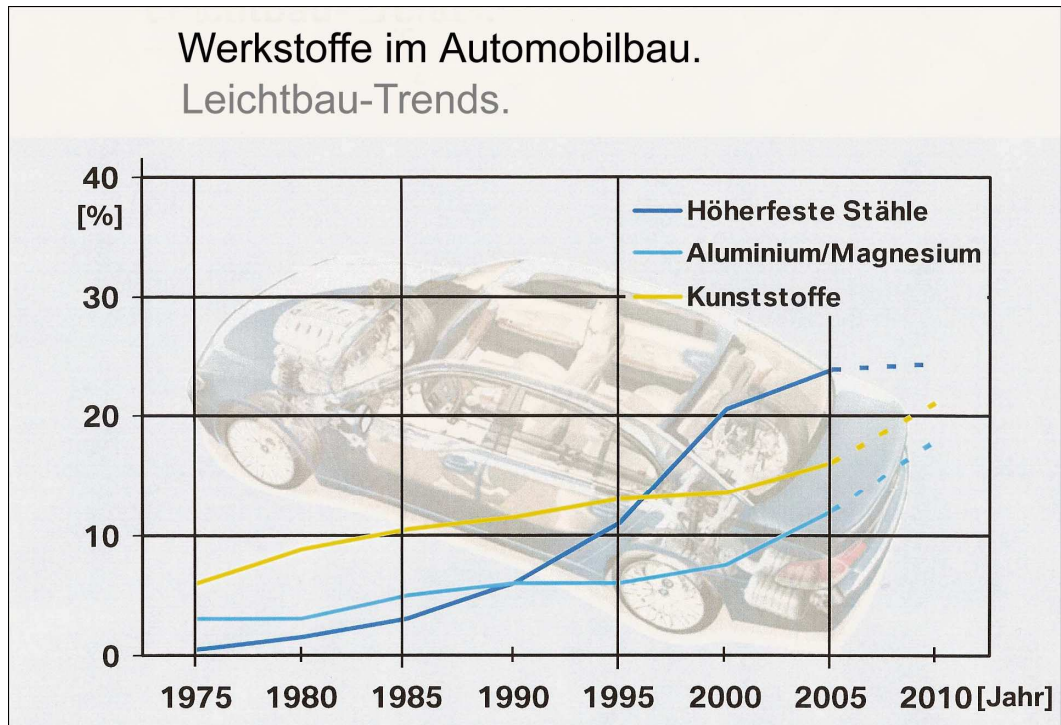


Abb. 27: Werkstoffe im Automobilbau (BMW Group)

## 9 Umformeigenschaften

Blechwerkstoffe werden häufig durch Ziehprozesse in ihre endgültige Form gebracht. Um solche Formänderungen versagensfrei durchlaufen zu können, muss der Werkstoff ein hohes Umformvermögen, eine niedrige Fließgrenze und hohe Festigkeit aufweisen. Bei der Blechbearbeitung durch Zieh- und Streckziehvorgänge ist es aufgrund der sehr unterschiedlichen Formänderungsverhältnisse an den verschiedenen Stellen des Werkstücks sehr schwierig, exakte Kriterien für die optimale Bearbeitbarkeit des Bleches festzulegen. Hinzu kommt, dass verfahrensbedingte Parameter wie Werkstoff, Werkzeug, Schmierstoff und Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück einen entscheidenden Einfluss auf die Umformfähigkeit des Bleches haben [19]. Wichtig sind bei allen Umformwerkstoffen die Umformbarkeit, der Verlauf der Fließkurve, die zulässigen Schwankungen der Werkstoffeigenschaften und ihrer Zusammensetzung sowie Fragen der Vor- und Zwischenbehandlung der Umformwerkstoffe.

Zur Vorherbestimmung der Eignung eines Blechwerkstoffes für ein bestimmtes Umformverfahren wurde eine Reihe von technologischen Versuchen entwickelt, die Streckzieh-, Tiefzieh- oder Biegebelastung simulieren. Meistens bestehen Umformprozesse in der Praxis aus einer Kombination dieser Belastungen. Daher werden oft mehrere Verfahren zur Beurteilung herangezogen [37]. In der Blechumformung unterscheidet man bei den legierten Stählen phosphorlegierte Stähle, Bake-Hardening-Stähle, die bei einer Wärmebehandlung, z. B. Einbrennlackierung bei 200°C nachträglich aushärten, ferritische Chromstähle, austenitische Chrom-Nickelstähle und mikrolegierte Feinkornbaustähle und den modernen Mehrphasenstählen.

Maßgeschneiderte Blechhalbzeuge unterschiedlicher Eigenschaften (Härte, Festigkeit, Oberfläche und Dicke) werden vor dem Umformen durch Laserschweißen gefügt und anschließend tiefgezogen. Dadurch werden bestimmte Werkstoffeigenschaften gezielt am geforderten Abschnitt des Werkstücks eingestellt (Leichtbaukonzept). In der Schweißzone darf es durch den Umformprozess nicht zur Rissbildung kommen [37]. In Bezug auf das zu fertigende Bauteil ist die gezielte Auswahl des Werkstoffes unter Berücksichtigung der notwendigen Umformkräfte von besonderer Bedeutung.

Abb. 28 gibt einen Überblick über das Spektrum und die Eigenschaften der heute verwendeten Stahlblechgüten im Automobilbau:

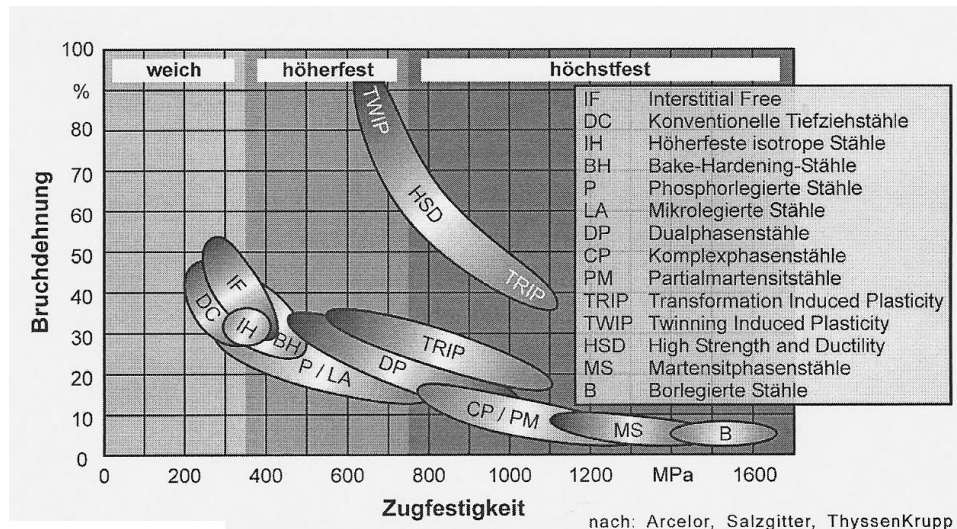


Abb. 28: Eigenschaftsprofil verschiedener Stähle für die Anwendung im Fahrzeugbau

### IF-Stähle

Höherfeste IF-Stähle (interstitial free) besitzen einen geringen Anteil interstitiell gelöster Bestandteile (Kohlenstoff, Stickstoff usw.) und sind stark verformbar. Ihre Festigkeit erreichen sie dadurch erst in der Kaltverfestigung. IF-Stähle werden für komplexe Ziehteile mit Streck- und Tiefziehbeanspruchung verwendet, wie z.B. Tür-Innenbleche, Seitenteile etc.) [16].

### Isotrope Stähle (IH)

Höherfeste Streckziehstähle werden für Bauteile eingesetzt, bei denen das Blech während des Umformvorganges im Bereich des Stempelkontakts möglichst nur aus der Dicke fließen soll, wie z.B. bei Türen, Hauben und Dächer. IH-Stähle eignen sich durch die homogen ausgeprägten Fließeigenschaften in Blechebene sehr gut zur Herstellung von flachen Teilen, die überwiegend streckgezogen werden.

### Bake-Hardening-Stähle

Bake-Hardening-Stähle (BH) setzt man für schwierige Tiefziehstähle mit erhöhtem Festigkeitsanspruch z.B. bei Karosserieaußenteilen ein. Sie erreichen ihre Festigkeit durch fein verteilte Ausscheidungen während des Lackeinbrennens bei ca. 170°. Davor sind diese Stähle noch gut umformbar.

### Mikrolegierte höherfeste Stähle

MH-Stähle werden für struktur- und crashrelevante Teile verwendet. Die Keimbildung der verschiedenen Legierungsbestandteile wird genutzt, um ein feinkörniges Gefüge zu erhalten. Gute Verformungseigenschaften lassen sich mit hohen Festigkeiten verbinden.

### Phosphorlegierte Stähle

P-Stähle werden durch ihre Gitterverspannungen in der Umformbarkeit behindert, so dass höhere Festigkeiten bei verringerter Bruchdehnung erreicht werden.

Eine Weiterentwicklung der konventionellen Stähle stellen die modernen Mehrphasenstähle dar, welche herausragende Festigkeiten bei gleichzeitig guten Umformeigenschaften besitzen. Gegenüber den konventionellen Stählen bieten diese Stähle weiteres Leichtbaupotential durch Reduzierung der Blechdicke unter Beibehaltung der Festigkeitseigenschaften.

Bei den Mehrphasenstählen werden die Eigenschaften durch Mischung unterschiedlich harter Gefügebestandteile gesteuert (Abb. 29). Dabei wird die Fähigkeit dieser Stähle genutzt, in Abhängigkeit von den Umform- und Abkühlbedingungen, unterschiedliche Gefügestrukturen durch Umwandlung herbeizuführen.

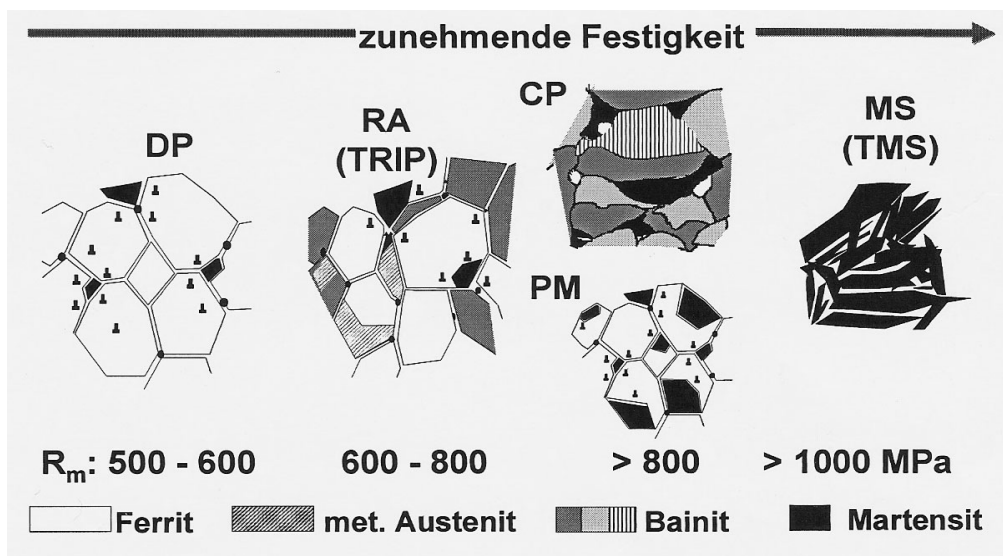


Abb. 29: Steuerung der Werkstoffeigenschaften warm- und kalt gewalzter Produkte (ThyssenKrupp)

Zu den modernen Mehrphasenstählen die heute im Automobilbau eingesetzt werden, zählen folgende Güten:

### Dualphasenstähle

Die sog. DP-Stähle werden für komplexe Verstärkungs- und Strukturbauteile und streckgezogene Karosserieaußenteile mit besonderer Beulfestigkeit, z.B. für Türen und Dächer, aber auch für die Herstellung gewichtsreduzierter Räder, eingesetzt. Ihr Eigenschaftsprofil beruht auf weichem Ferrit und kleinen ( $2\ \mu\text{m}$ ) harten Martensitinseln. DP-Stähle weisen ein niedriges Streckgrenzenverhältnis ( $R_{p0,2}/R_m$ ), sowie hohe Gleichmaß- und Bruchdehnung auf. Hohe Festigkeiten von 500 bis 650 MPa werden auch hier durch die Umformung erreicht.

### Complexphasen-Stähle (CP)

Diese Stähle besitzen ein extrem feinkörniges Gefüge. Die Zusammensetzung besteht aus überwiegend harten Phasen Martensit, angelassener Martensit bzw. Bainit und geringen kohlenstoffarmen Ferritanteilen. Aufgrund der homogenen Festigkeitsverteilung im Gefüge

sind lokale Dehnungen gleichmäßig verteilt, was bei Umformungen mit lokal stark unterschiedlichen Deformationen, z. B. bei Biegevorängen, vorteilhaft ist. Diese Stähle markieren den Übergang zu den höchstfesten Stählen mit Zugfestigkeiten oberhalb von 800 MPa. [28]. CP-Stähle kommen zum Einsatz für Teile mit ausgeprägter Crashrelevanz und einfachen geometrischen Anforderungen (z.B. Verstärkung der A-Säule beim Cabrio) [28].

### TRIP- und TWIP Stähle

Transformation Induced Plasticity (TRIP) meint die durch Kristallgitter Transformation induzierte plastische Verformbarkeit bei gleichzeitig hoher Verfestigung. Seine extreme Dehnbarkeit erreicht der Stahl durch den TWIP-Effekt (Twinning Induced Plasticity), der durch die Zwillingsbildung die Umformbarkeit verbessert. TRIP-Stähle bezeichnet man auch durch eine Einlagerung von ca. 15 Vol.-% Restaustenit in eine ferritisch-bainitische Grundmatrix als Restaustenit-Stähle. Über verformungsinduzierte Umwandlung des Restaustenits zu Martensit werden in Bezug auf die hohe Festigkeit beste Umformeigenschaften erzielt. Diese Stahlgüte weist ein sehr feinkörniges Gefüge mit Korngrößen zwischen 25 und 70  $\mu\text{m}^2$  bei guter Duktilität und hoher Zugfestigkeit auf. Aufgrund des hohen Umformvermögens auch bei großer Formänderung verwendet man diesen Stahl für Strukturbauteile mit besonders hohem Energieabsorptionsvermögen (z.B. Säulen und Längsträger) und komplexen Bauteilen [29], [19].

### Martensitphasen-Stähle (MS)

Höchste Zugfestigkeiten stellen Martensitphasen-Stähle bereit. Dies wird durch nahezu vollständige Umwandlung des Austenit in Martensit erreicht. Um die Duktilität dieser MS-Stähle zu steigern, werden sie häufig angelassen und erreichen damit ein bemerkenswertes Umformvermögen bei Zugfestigkeiten bis zu 1500 MPa.

Einsatz für Bauteile mit ausgeprägter Crashrelevanz (z.B. Seitenaufprallträger).

### Borlegierte Stähle (B)

Mangan-Bor-Stähle bieten höchste Festigkeiten bis zu 1650 MPa im warmumformgehärteten Zustand. Bor ist ein Legierungselement mit der stärksten härtebarkeitssteigernden Wirkung. Es verzögert die Umwandlung in weiche Gefügebestandteile und lässt ein martensitisches Gefüge entstehen. Borlegierte hochfeste Stähle verfügen über eine Festigkeit von ca. 500 bis 600 MPa. Erst durch die Wärmebehandlung (Warmumformung) und anschließende kontrollierte Abkühlung stellen sich die endgültigen Eigenschaften des Stahls (martensitische Gefügeausbildung und hohe Festigkeiten) ein. Im Karosseriebau werden borlegierte Stähle als Verstärkungen zur Abstützung von Bauteilen verwendet [28].



### HSD-Stähle

Die neu entwickelten HSD-Stähle (High Strength Ductility) mit hohen Gehalten an preisgünstigen Legierungselementen wie Mangan (15 – 25 %), Aluminium und Silizium (jeweils ca. 3 %) weisen höchste Festigkeiten bei gleichzeitiger Dehnbarkeit zwischen 50 und 90 % in Abhängigkeit von der Höhe des Mangangehaltes auf. Diese Eigenschaften werden durch den TRIP-Effekt (durch Kristallgitter-Transformation induzierte, plastische Verformbarkeit bei gleichzeitig hoher Verfestigung) und den TWIP-Effekt (Twinning Induced Plasticity – durch Zwillingsbildung induzierte Plastizität) erreicht. Dabei klappt die Kristallstruktur um und es entstehen gespiegelte Kristallbereiche. Dieser Stahl besitzt somit eine Art doppelte Dehnungsreserve, die die Umformbarkeit erheblich verbessert. HSD-Stählen wird ein starkes Marktpotential zugeordnet, jedoch müssen zunächst die technischen Voraussetzungen für die Verarbeitung der Stähle ausreichend erforscht, entwickelt und angepasst werden, um die Umsetzung in eine effiziente großindustrielle Produktion zu erreichen. Der extremen Dehnbarkeit und hohen Umformbarkeit dieser Stähle steht als Nachteil die etwas geringere Steifigkeit im Vergleich mit anderen hochfesten Stählen gegenüber, was in der Konstruktion und Gestaltung von tragenden Karosserieteilen Berücksichtigung finden muss [29].

## 10 Prüfverfahren und Qualitätssicherung

Das Tailored Blank-Schweißen ist ein hoch technisierter Vorgang, der wirtschaftlich immer mehr unter Druck gerät. Die Schweißnähte von Tailored Blanks müssen fehlerfrei sein, um dem nachfolgenden Umformprozess standzuhalten. Aus diesem Grunde werden u. a. zerstörungsfreie Prüfungen angewendet. Da Unsicherheiten in der Konstanthaltung der Prozessparameter und der Teilevorbereitung auftreten können, ist eine 100%ige Prüfung aller Schweißnähte unerlässlich. Aufgrund hoher Produktionsvolumen muss die Prüfung in den Produktionsprozess integriert werden und fehlerhafte Blanks direkt aussortieren. Die Prozessintegration erfordert eine Inspektionsgeschwindigkeit von  $< 0,5 \text{ m/s}$  und eine einfach zu automatisierende und kostengünstige online-Signalauswertung. Gleichzeitig werden in Linie an Stichproben visuelle Kontrollen und Röntgenuntersuchungen durchgeführt und die untersuchten Platinen anschließend wieder in den Prozess zurückgeschleust.

### 10.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

#### 10.1.1 Ultraschallprüfung

Für die trockene Ultraschallprüfung von Tailored Blanks werden elektromagnetische Ultraschall (EMUS)-Prüfköpfe im online-Verfahren eingesetzt. Abb. 30 zeigt einen in die Fertigungslinie integrierten EMUS-Prüfkopf.



Abb. 30: EMUS-Prüfkopf in einer Laserschweißanlage für Tailored Blanks [35]

Die Prüfung erfolgt in der klassischen Impulsecho-Technik unter Nutzung spiegelnd reflektierter und gebeugter Signale aus der Schweißnaht. Gemäß Abb. 30 wird der Prüfkopf auf einer der Oberflächen des dünneren Blank aufgesetzt und strahlt den Ultraschallimpuls schräg in Richtung der Schweißnaht. Der Abstand des Prüfkopfes zur Schweißnaht ergibt sich aus der Lage des Fokuspunktes der S/E-Anordnung [35].

Aus der Schweißnaht zurückkommende Echosignale werden mittels zwei getrennten Empfängern als spiegelnd reflektierte und gebeugte Signale aufgenommen (Abb. 31). Deren Maximalwerte werden als getrennte Amplitudenortskurven beim Verfahren des Prüfkopfes dargestellt. Damit ist eine Unterscheidung zwischen den von lang gestreckten Fehlern (ungenügende Durchschweißung, Versatz, Bindefehlern) reflektierten Anteilen und von den lokalen globularen Fehlern (Löcher, Poren) gebeugten Anteilen gegeben [35].

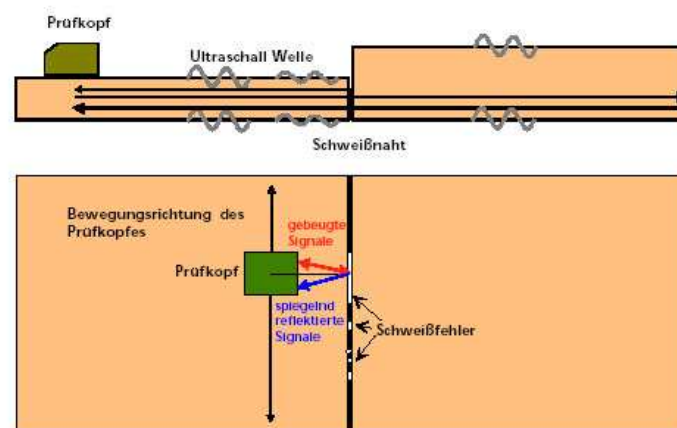


Abb. 31: Prinzip der Prüfung der Laserschweißnähte [35]

Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt im oberen Teilbild die aufgenommenen Messdaten einer Prüfung. Eine sehr klare Anzeige erfolgte über die spiegelnde Reflexion (obere Messkurve) und das Blank wurde von der Anlage aussortiert. Im Elektronen-Mikroskop (unteres Teilbild) konnte die Fehlerursache geklärt werden: ein Flankenbindefehler am Übergang der Schweißnaht zum dickeren Blech [35].

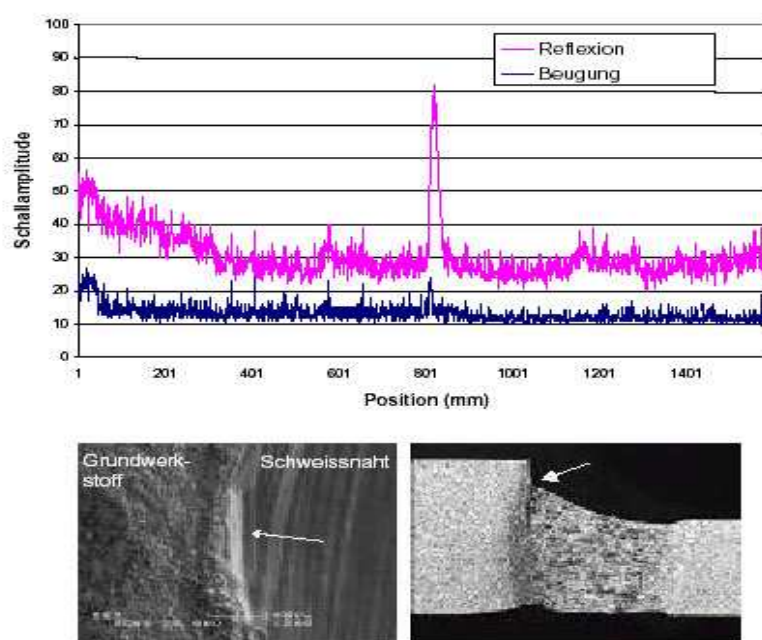


Abb. 32: Anzeige eines Flankenbindefehlers in einer Laserschweißnaht [35]

In dünnwandigen platten- oder rohrförmigen Produkten existieren geführte Ultraschallwellen, die sich als Plattenwelle in einem flachen Blech oder in der Wand eines Rohres mit einem im Vergleich zur Wellenlänge großen Krümmungsradius sowohl in axialer als auch in Umfangsrichtung ausbreiten können [35].

Man unterscheidet zwei Arten dieser Plattenwellen:

- die Lamb-Wellen, die in der Einfallsebene (Zeichenebene) schwingen
- die SH-Wellen mit senkrecht zur Zeichenebene gerichteter Polarisation

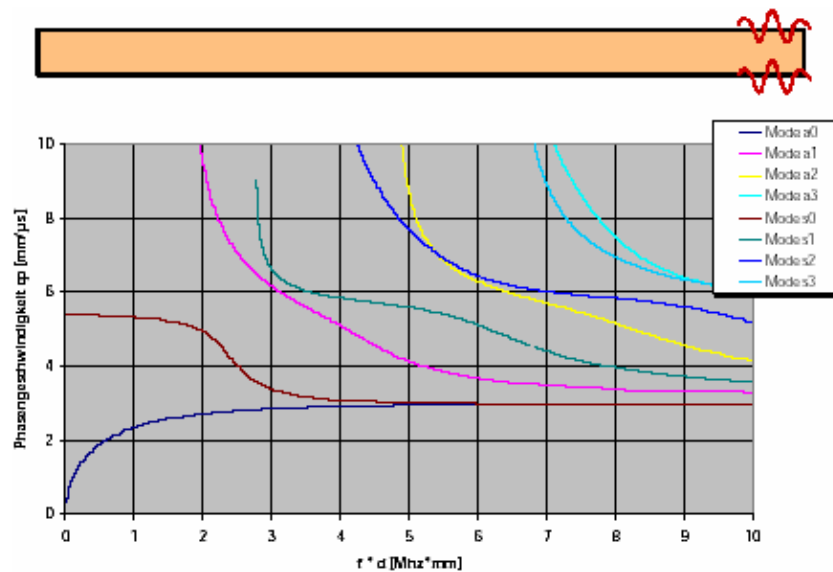


Abb.: 33a) Dispersionsdiagramm der Lamb-Wellen [35]

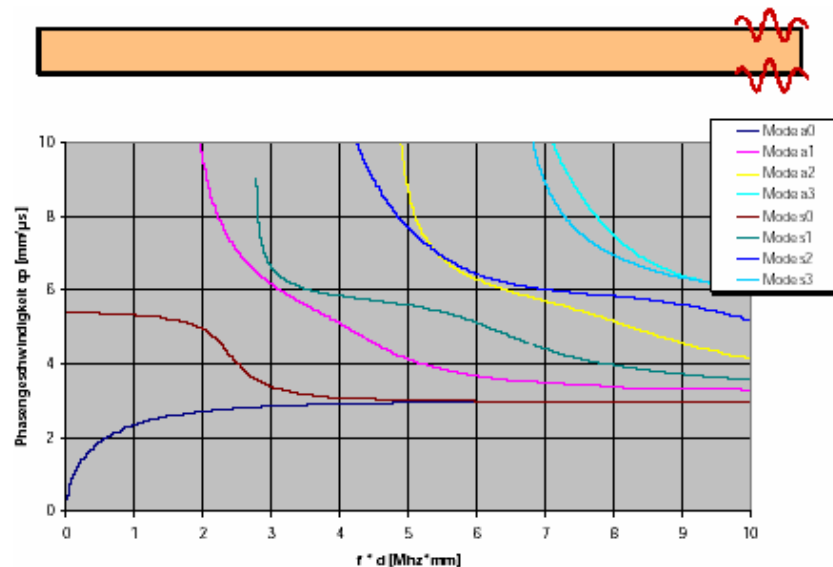


Abb.: 33 b) Dispersionsdiagramm der SH-Plattenwellen [35]

Das Ausbreitungsverhalten beider Polarisierungen wird durch ihre Dispersionsprogramme wiedergegeben. Kennzeichnend ist die von der Dicke  $d$  und der Ultraschallfrequenz  $f$  abhängige Geschwindigkeit fast aller Ausbreitungs-Moden mit Ausnahme des Grundmodes  $SS_0$  der

SH-Plattenwellen. Dieser ist dispersionsfrei und breitet sich unabhängig von Dicke und Frequenz mit der Transversalwellen-Geschwindigkeit des Materials aus. Die höheren Moden werden ausbreitungsfähig bei unteren Grenzfrequenzen; ihre Geschwindigkeiten nähern sich mit wachsendem  $f \cdot d$  asymptotisch an die Geschwindigkeiten der Raleighwelle (Grundmoden der Lamb-Wellen) bzw. der räumlichen Transversalwellen an.

Bei Tailored Blanks verbindet die Schweißnaht stumpf zwei unterschiedlich dicke Platinen. Bei der Ultraschallprüfung darf der Dickensprung im Bereich der Schweißnaht kein zusätzliches Echo erzeugen. Der dispersionsfreie Grundmode  $SS_0$  breitet sich in beiden Platinen mit gleicher Geschwindigkeit aus; die Ultraschallwelle erfährt keine Änderung der akustischen Impedanz durch den Dickenübergang, so dass die empfindliche vollvolumetrische Fehlerprüfung der Laserschweißnähte von Tailored Blanks ermöglicht wird [35].

### **10.1.2 Elektronische Laser-Speckle Interferometrie**

Ein weiteres berührungslos arbeitendes Messverfahren zur Prüfung des Dehnungsverhaltens im Schweißnahtbereich von gefügten Blechplatinen ist die Elektronische Laser Speckle Pattern Interferometrie (ESPI), die eine ganzflächige Erfassung von Verformungen, Oberflächenverschiebungen, Dehnungsfeldern und -konzentrationen ermöglicht. Diese innovative optische Messmethode ist in ihrer gerätetechnischen Umsetzung eine bereits in vielen industriellen Anwendungen eingesetzte Methode. Sie verwendet einen schräg auf das Messobjekt gerichteten Laserstrahl, welcher diffus reflektiert und von einer hoch auflösenden Videokamera aufgenommen wird. Gleichzeitig wird aus dem Laserstrahl ein Referenzstrahl ausgeblendet und mit dem reflektierten Licht zur Interferenz gebracht. Diese Interferenz führt zu einer Phasenverteilung der Wellen beider Laserstrahlen, die sich in einem Speckle Bild der Intensitätsverteilung erkennen lässt. Das Bild verändert sich in Abhängigkeit von der Verformung der angestrahlten Fläche. Vergleicht man die Intensitätsverteilungen im unbelasteten und im belasteten Fall, gibt das Differenzbild Aufschluss über die eingetretene Verformung. Ebenso kann ein räumlicher Verschiebungsvektor im betrachteten Punkt bestimmt werden, wenn drei Interferenzbilder aus verschiedenen Beleuchtungsrichtungen ausgewertet werden. Dabei wird eine 3D-Verformungsanalyse an Bauteilen mit ebenen Flächen möglich. So können sehr leicht lokale Dehnungsgradienten, Bereiche des Fließbeginns sowie Rissentwicklungen und lokale Scherbänder im Oberflächenbereich beobachtet werden. Aufgrund dieses messempfindlichen Systems können entsprechende Untersuchungen bereits bei geringen Kräften und Dehnungen eingesetzt werden. Ebenso sind diese optischen Messungen nicht allein auf ebene Flächen angewiesen sondern sind in der Lage, auch Strukturen und Konturen zu erfassen und auswerten. Diese sich aus den Messungen ergebenden Aussagen über die Werkstoffbeeinflussung können im Verhältnis zum unbeeinflussten Werkstoff dargestellt

werden. In Abb. 34 ist das Funktionsprinzip von ESPI schematisch dargestellt [38].

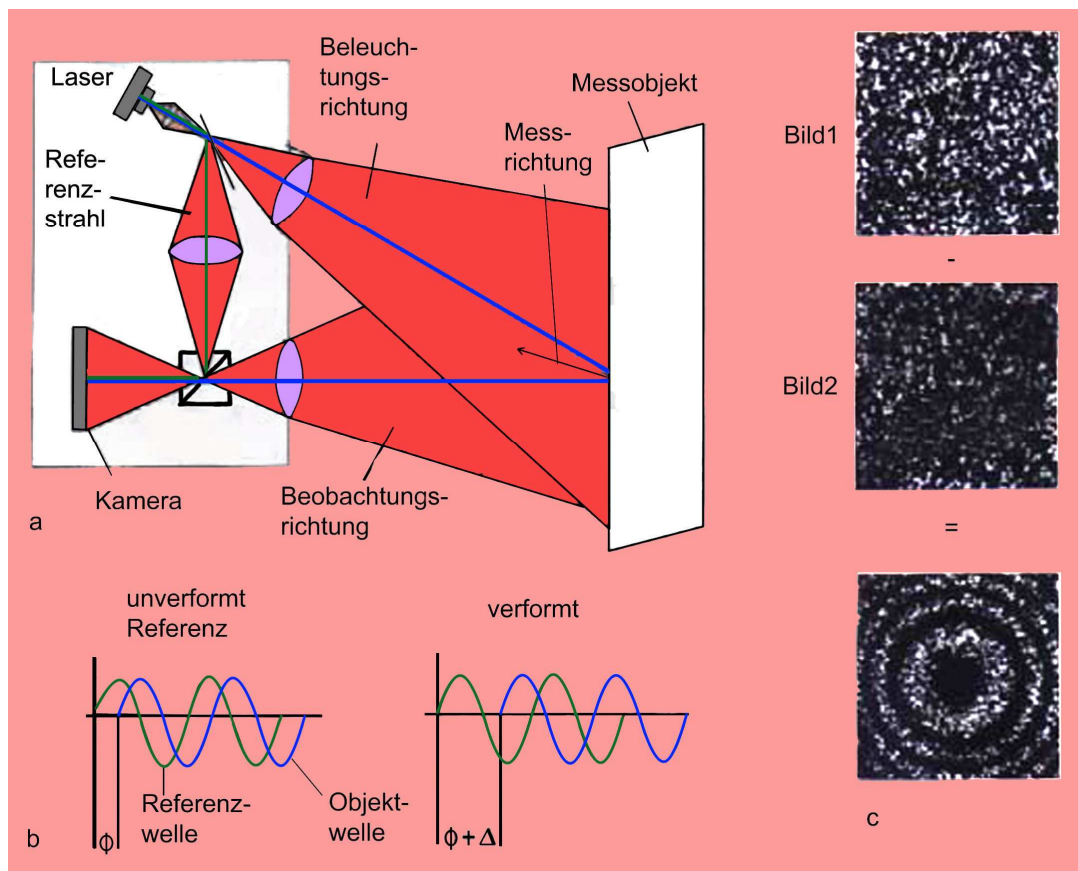


Abb. 34: Funktionsprinzip der Electronic-Speckle-Pattern-Interferometry

- a) prinzipieller Aufbau des optischen Sensors,
- b) Phasenverschiebung des Laserlichts bei unverformtem und bei verformten Bauteil
- c) Das Differenzbild enthält die Information über die Verformung [38].

### 10.1.3 Metallografie mit Lichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop

Metallografische Untersuchungen dienen der qualitativen (optischen) und quantitativen (geometrischen) Beurteilung der Gefügemerkmale von Schweißverbindungen. Eine Analyse der Gefügezustände ermöglicht es, die Eigenschaften der Werkstoffe unter den gegebenen Beanspruchungen zu beurteilen. In der Produktionstechnik dient die Metallografie der Entwicklung von neuen und der Optimierung von bestehenden Fertigungsprozessen. Sie liefert wesentliche Erkenntnisse für eine stabile Prozessführung, bietet Rückschlüsse auf Temperaturverläufe, Zusammenhänge zwischen chemischen Zusammensetzungen und technologischen Prozessen und sichert vorgegebene Qualitätsanforderungen. Bestandteile im Schweißnahtgefüge von metallischen Werkstoffen können vor allem Körner, Versetzungen, Korngrenzen, Ausscheidungen und Phasen, wie Ferrit, Austenit, Perlit und Martensit aber auch Defekte wie Poren, Bindefehler, Einschlüsse, Verunreinigungen und Risse sein.

Die metallografischen Untersuchungen können mit einem Lichtmikroskop anhand von Schliffen, die den jeweiligen Schweißnähten entnommen werden, erfolgen. Da Metalle für Licht undurchlässig sind, kann mit dem Mikroskop nur die Probenoberfläche untersucht werden (Auflichtmikroskopie). Zur Untersuchung werden entnommene Probenstücke in entsprechendes Trägermaterial eingebettet, geschliffen und poliert. Anschließend werden die Proben entsprechend präpariert, um sie im Auflichtverfahren sichtbar zu machen. Dies geschieht durch Ätzung mit unterschiedlichen Lösungen. Da der chemische Angriff des Ätzmittels auf die verschiedenen Gefügebestandteile von deren Orientierung und chemischen Zusammensetzung abhängt, wird das Reflektionsverhalten der Gefügebestandteile so verändert, dass eine eindeutige Unterscheidung möglich wird.

Neben der Auflichtmikroskopie mittels Lichtmikroskop (bis zu ca. 1000fache Vergrößerung) kommt zur Gefügeuntersuchung auch die Rasterelektronenmikroskopie zur Anwendung, mit dessen hoher Auflösung feinste Details von Bruchverläufen, Rissen und Oberflächenfehlern im Mikroschliff dokumentiert werden können. Dabei wird üblicherweise das Gefüge über die gesamte Schweißnahttiefe betrachtet, um den Einfluss der Temperaturgradienten bei der Wärmebehandlung und die Dicke von Härteschichten und Härteverläufe zu untersuchen und zu interpretieren. Die Probe wird in einer Vakuum-Röhre fixiert und mit einer sehr kleinen, dünnen Nadel zeilenförmig „abgetastet“. Von der Nadelspitze zur Probenoberfläche können in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Probe und Nadel Elektronen überspringen. Die dafür benötigte elektrische Energie wird gemessen und über die Verarbeitung dieser Daten kann ein sehr präzises Bild der Probenoberfläche dargestellt werden. Die maximale Vergrößerung eines REM reicht bis zu 200.000x. Mit einem Großkammerrasterelektronenmikroskop sind so auch Schadensanalysen an großvolumigen Bauteilen möglich. Rasterelektronenmikroskope sind aufgrund des komplexen Aufbaus und der erheblich größeren Auflösung sehr viel teurer als Lichtmikroskope. Ihr Einsatz richtet sich daher nach dem erwünschten Untersuchungsziel.

## **10.2 Zerstörende Prüfverfahren**

Neben den zerstörungsfreien Verfahren gibt es jedoch auch mechanische und technologische Prüfungen. Während die mechanische Prüfungen wie der Querkzugversuch vor allem dazu dienen festzustellen, ob die Werkstoffeigenschaften den Qualitätsanforderungen entsprechen, untersucht man mit den technologischen Prüfungen, zum Beispiel dem Tiefungsversuch, inwieweit sich die Platinen für bestimmte Umformverfahren eignen.

### **10.2.1 Zugprüfung mit quasistatischer Belastung**

Zur Ermittlung der statischen Festigkeit von Schweißverbindungen kommt gewöhnlich der Querkzugversuch nach DIN EN 895/ISO 4136 (alt: DIN EN 50120) zur Anwendung. Die Prüfung erfolgt – soweit aufgrund des vorgesehenen Einsatzzweckes nicht anders vorgesehen, bei Raumtemperatur. Anhand des Zugversuches kann man feststellen, wie sich eine quer zur Naht angeordnete Probe bei einer momentfreien, einachsigen auf den gesamten Probenquerschnitt wirkenden Zugbeanspruchung verhält. Es wird hierbei vor allem dessen werkstoffspezifisches Verhalten hinsichtlich seiner Längenänderung und seiner Querschnittsverjüngung in verschiedenen Bereichen des Werkstoffs bis zum Bruch der Probe überprüft. Durch das Dehnen einer Zugprobe bis zum Bruch werden Festigkeits- und Verformungskennwerte (Bruchdehnung, Brucheinschnürung, Dehngrenze, obere und untere Streckgrenze, sowie die Zugfestigkeit) bestimmt.

Der einachsige Querkzugversuch ist ein unproblematisches und zuverlässiges Prüfverfahren zur Bewertung des Blechwerkstoffverhaltens. Hier ermittelte Ergebnisse kommen sowohl bei der Werkstoffentwicklung und Konstruktion als auch bei der Bauteilauslegung und Qualitätskontrolle zum Einsatz. Der Querkzugversuch wird im Blechdickenbereich unterhalb 3 mm durchgeführt. Infolge der auftretenden Zugspannungen verformen sich die Proben zunächst homogen elastisch und schließlich plastisch. Oberhalb einer bestimmten Dehnung tritt eine plastische Instabilität auf. Bei fortgesetzter Belastung wird nur noch ein geringer Bereich der Probe weiter verformt. Schließlich versagt der Werkstoff bei einer bestimmten, spezifischen Dehnung und die Probe geht zu Bruch [21], [11], [4].

### **10.2.2 Zugprüfung mit dynamischer Belastung**

Um die mechanischen Eigenschaften von Schweißverbindungen zu ermitteln, wird der Dauerschwingversuch angewendet. Er erfolgt unter andauernder schwellender oder wechselnder Belastung der Schweißnaht. Beanspruchungen von Bauteilen hinsichtlich der Dauerfestigkeit sind axiale und tordierende Schwingungen, Biegeschwingungen sowie umlaufende Belas-



tungen. In Bezug auf Schweißnahtprüfungen lassen sich jedoch umlaufende Belastungen und Biegeschwingungen auf axiale Belastungen zurückführen.

Als problematisch stellt sich der wesentliche Einfluss der Geometrie des jeweiligen Bauteils auf die Dauerfestigkeit dar. In DIN 50100, die den Dauerschwingversuch beschreibt, sind daher nur Richtlinien sowie Verfahren zur Auswertung der Ergebnisse und die Systematik der Prüfung festgelegt. Die Durchführung der Schwingversuche hängt im Wesentlichen von dem zu prüfenden Bauteil, der zu untersuchenden Art der Beanspruchung und der eingesetzten Prüfmaschine ab.

Neben den Prüfungen von Serienbauteilen stellt die Prüfung von Werkstücken, deren Geometrie an die der Flachzugproben für den Querschugversuch angelehnt ist, die am häufigsten angewandte Methode zur Bewertung der Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen dar. In anwendungsspezifischen Vorschriften bzw. Vereinbarungen ist die exakte Durchführung der Proben festzuhalten. [21].

### 10.2.3 Härtemessung

Unter der Härte des Werkstoffs versteht man den Widerstand der Materialoberfläche gegen lokale plastische Verformung durch einen härteren Prüfkörper. Man unterscheidet statische und dynamische Verfahren zur Härtemessung. Die Härteprüfungen gehören zu den am meisten in der Technik angewendeten Prüfverfahren und liefern wichtige Informationen z. B. über die Festigkeit oder den Verschleißwiderstand von Stählen. Alle beruhen auf dem gleichen Prinzip: Ein Eindringkörper wird stetig mit bestimmter Prüfkraft in die blank geschliffene Oberfläche des Werkstoffes mit definierter Kraft langsam eingedrückt. Die örtliche Verformung - die sich aus dem plastischen und dem elastischen Anteil zusammensetzt - wird gemessen. Die statischen Messungen erfassen jedoch nur den plastischen Verformungsanteil. Je nach Größe der Prüfkraft unterscheidet man: Makro- (Prüfkraft  $F > 50 \text{ N}$ ), Kleinlast- ( $2 - 50 \text{ N}$ ) und Mikrohärt ( $< 0,5 \text{ N}$ ). So ist es möglich, die Härte einzelner Kristallite bzw. Einschlüsse zu messen oder die Bestimmung des Härteverlaufs in Diffusionszonen vorzunehmen. Zu den statischen Härteprüfverfahren gehören die Härtemessung nach Brinell, bei welchem eine Kugel, Vickers, bei dem eine Vierkant-Diamantpyramide sowie den Rockwell-B oder -C-Verfahren, bei welchen eine Kugel oder ein Diamantkegel als Eindringkörper verwendet wird. Bei den dynamischen Verfahren (Shorehärte- oder Pendelhammer-Methode, Schlaghärteprüfung) wird der Eindringkörper mit einer kinetischen Energie aus einem definierten Abstand in das Prüfteil gestoßen. Auf diese Weise werden Rohre, Turbinenwellen oder Schmiedestücke geprüft. Für den Vergleich der Ergebnisse, die nach verschiedenen Verfahren gewonnen wurden, stehen Tabellen zur Verfügung. [11], [4].

### 10.2.4 Erichsen-Prüfung

Mit dem Tiefungsversuch nach Erichsen (Abb. 35) wird die Streckziehfähigkeit von Blechen und Bändern mit Dicken von 0,2 bis 3,0 mm geprüft. Tiefziehen zählt zu den wichtigsten Verfahren der Blechumformung. Als Maß wird der so genannte Erichsenindex IE (Eindringtiefe die ein Stempel im Moment des Einreißens im Blech hinterlässt) angegeben, der nach DIN 50101 standardisiert ist. An Bleche und Bänder für Tiefziehzwecke werden hohe Anforderungen in Bezug auf ihre Kaltumformbarkeit gestellt. Sie müssen bei der Bearbeitung einer hohen plastischen Verformung standhalten, ohne dass dabei Risse auftreten. Die wichtigsten Anforderungen an ein Tiefziehblech sind:

- eine niedrige Streckgrenze, um Kraftbedarf und Werkzeugverschleiß gering zu halten,
- ein hoher Verfestigungskoeffizient, damit das fertige Werkstück eine hohe Festigkeit bekommt,
- eine hohe Gleichmaßdehnung, damit es beim Tiefziehen nicht zu Einschnürungen kommt,
- ein feinkörniges Gefüge zum Ausgleich der Anisotropie der Einzelkristalle sowie zum Vermeiden von Oberflächennarbigkeit (Apfelsinhaut)
- eine regellose Orientierung, da Texturen zu Zipfelbildung führen [7].

Der Werkstoff wird in die Prüfvorrichtung eingelegt und durch eine Niederhaltkraft auf der Matrize gehalten. Ein kugelförmiger Stempel drückt nun von unten gegen das Blech und bewirkt somit eine Kaltverformung. Das Blech formt sich kalottenförmig aus, bis ein Riss entsteht.

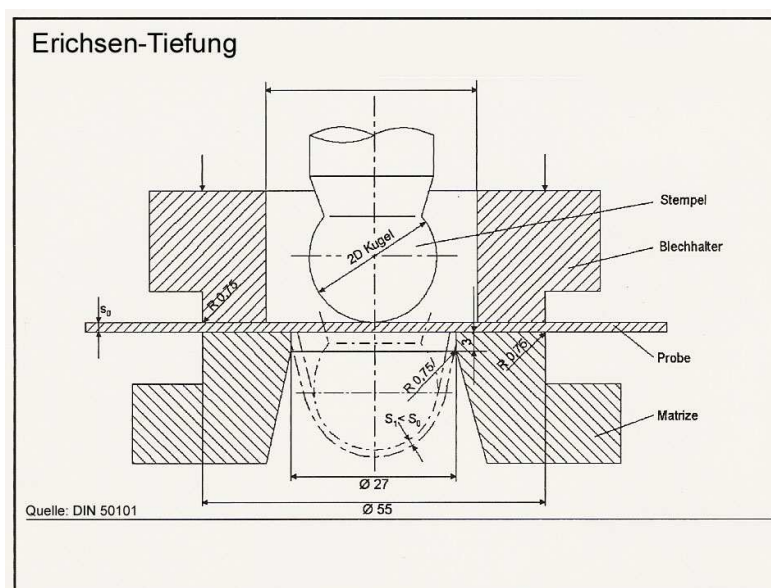


Abb. 35: Schematische Abbildung eines Tiefungsversuchs nach Erichsen [DIN 50101]

Als Riss gilt das Auftreten einer Materialtrennung, die durch die ganze Dicke der Probe geht. Das Erreichen der Bruchlast wird durch Lastabfall an der Maschine und Beobachtung der Rissbildung am Blech ermittelt. Nach dem Tiefen wird die Eindringtiefe IE mit einer Genauigkeit von 1/10 mm direkt vom Prüfgerät abgelesen. Die Oberfläche der Kugelkalotte erlaubt Rückschlüsse auf die Gefügestruktur und die Korngröße des Prüfmaterials, sowie auf grundsätzliche Auswirkungen hinsichtlich des Formgebungsverhaltens. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Änderung der Rauigkeit der Oberfläche des Bleches durch die Verformung und der Verlauf des Risses beim Bruch.

Über das Aussehen der gezogenen Probe und den Vergleich mit entsprechenden Erfahrungswerten ergeben sich folgende Anhaltspunkte für die Verwendbarkeit und der Umformfähigkeit des geprüften Bleches:

- Radialer Riss → „faseriges“ Gefüge, wenig geeignet
- Ringförmiger Riss → „gut“ zum Tiefziehen geeignet
- Glatte Oberfläche → „feines“ Korn, gut geeignet
- Raue Oberfläche → „grobes“ Korn, wenig geeignet

Zur Ermittlung der Blechgüte werden die Ergebnisse in ein Diagramm übertragen und mit einem Normdiagramm verglichen [7].

## 11 Oberflächenveredelung/Korrosionsschutz

Die Oberflächen von Metallen unterliegen verschiedenen Wechselwirkungen zwischen Werkstoffarten und Umgebungseinflüssen, die zur Veränderung der Eigenschaften und Funktionsbeeinträchtigungen führen können. (z.B. Lochfraßkorrosion, Spaltkorrosion, Interkristalline Korrosion). Die Verbesserung oder Wiederherstellung der Oberflächeneigenschaften in Bezug auf den Korrosionsschutz und die Verschleißbeständigkeit sind im Hinblick auf eine verlängerte Lebensdauer von Bauteilen technisches und wirtschaftliches Ziel in Planung, Ausführung und Produktion. Die Arbeiten sollten dabei nur so aufwendig wie nötig und nicht so aufwendig wie möglich gestaltet werden. Der Zwang zur wirtschaftlichen Fertigung bedingt einen sparsamen Energieverbrauch und rationellen Werkstoffeinsatz. Für die Herstellung von Oberflächenschichten und Korrosionsschutzmaßnahmen stehen eine Vielzahl von Beschichtungsverfahren zur Verfügung.

### 11.1 Metallische Überzüge

Neben der geeigneten Wahl von Werkstoff und optimaler Konstruktion werden Bauteile in der Verkehrstechnik mit metallischen Überzügen (kathodisches Schutzverfahren) versehen. Das kathodische Verfahren ist ein Schutzverfahren für Stahl durch Kontakt mit einer Anode aus Zink unter Gegenwart eines Elektrolyten. Dabei geht das unedle Metall (Zinkanode) in Lösung, während der Stahl (Kathode) nicht angegriffen wird.

Überwiegend werden Reinzink, Zinklegierungen (Zink-Aluminium, Zink-Magnesium) oder Mehrschichtsysteme verwendet. Grundsätzlich sind alle gängigen, elektrisch leitfähigen Beschichtungen (ein- und beidseitig) schweißbar. Das Verzinken ist ein zuverlässiges und modernes Verfahren. Im Fahrzeugbau kommen in den meisten Fällen voll verzinkte Karosserien zum Einsatz. Dabei werden überwiegend bandbeschichtete Stahlfeinbleche verwendet [28]. Bereits beim Stahlhersteller erhält der Bandstahl in automatisch betriebenen Anlagen im Durchlaufverfahren einen Überzug aus schmelzflüssigem Zink. Dieses sog. Feuerverzinken kann jedoch auch als diskontinuierliches Verfahren angewendet werden, bei welchem die zu verzinkenden Bauteile einzeln in schmelzflüssiges Zink getaucht werden. Beim Karosseriebau werden feuerverzinkte Bauteile in der Regel im Innenbereich verarbeitet, wobei für den Außenhautbereich aus optischen Gründen galvanisch bzw. elektrolytisch verzinkte Teile eingesetzt werden.

In jüngeren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gelang es, unter produktionsnahen Bedingungen in einem kontinuierlichen Prozess elektrolytisch verzinktes Stahlband mit einer neuartigen Zink-Magnesium-Oberflächenveredelung zu fertigen. Ein wesentliches Merkmal hierbei ist die Kombination von physikalischer Dampfphasenabscheidung (PVD-Physical Vapour Deposition) von Magnesium und einer thermischen Nachbehandlung. Der neue

Legierungsüberzug bietet die Möglichkeit, die Dicke der metallischen Auflage zu halbieren – bei mindestens gleicher Korrosionsschutzwirkung wie bei herkömmlich verzinktem Feinblech. Behält man die bislang übliche Dicke der metallischen Auflage bei, wird der Korrosionsschutz im Vergleich zum konventionellen Produkt deutlich vergrößert. Seine hervorragende Korrosionsbeständigkeit konnte das Produkt mit der Bezeichnung ZE-Mg bereits belegen. Bei einem Vergleich von konventionell verzinktem Feinblech mit 7,5 µm Überzugsdicke und ZE-Mg mit einer Überzugsdicke von 3,5 µm (ZE-Mg 35/35) sowie ZE-Mg mit einer Auflage von 7,5 µm (ZE-Mg 75/75) in der Salzsprühnebelprüfung war die Korrosionsbeständigkeit der ZE-Mg 35/35-Probe bereits erheblich besser, wie die der konventionellen Probe. Bis die Probe des ZE-Mg 75/75 erste Rostspuren zeigte, dauerte es etwa zehnmal so lange. Diese Ergebnisse bestätigten sich auch bei tiefgezogenen Proben. Daraus resultieren erhebliche Vorteile in der Weiterverarbeitung, insbesondere beim Laserschweißen. Behält man die bislang übliche metallische Auflage bei, wird der Korrosionsschutz deutlich erhöht, mit dem Vorteil, dass sekundäre Korrosionsschutzmaßnahmen eingespart werden können [44].

## 11.2 Organische Beschichtungen

Um den Korrosionsschutz verzinkter Stahlbleche nochmals zu verbessern, können zinkstaubpigmentierte, organische Beschichtungsstoffe als Schutzschichten auf die Stahlteile appliziert werden. Während die Dünnschichtbeschichtungen der ersten Generation mit globularem Zinkstaub pigmentiert und in Schichtdicken zwischen 2,5 und 4,5 µm aufgetragen werden, sind die Beschichtungssysteme der zweiten Generation mit Eisenphosphid und/oder Zinkstaub pigmentiert, werden im Schichtdickenbereich zwischen 3,5 und 8 µm appliziert und weisen einen erhöhten Korrosionsschutz auf [28]. So können sekundäre Korrosionsschutzmaßnahmen wie Hohlraumkonservierung und Nahtabdichtung vereinfacht werden oder wegfallen. Dies ermöglicht eine geringere Fertigungstiefe im Automobilbau. Im Übrigen werden die Umformeigenschaften der Bleche durch zusätzliche Gleiteigenschaften des Lackfilms verbessert [40].

## 12 Anwendung und Verarbeitung von maßgeschneiderten Platinen

Die Möglichkeiten der Anwendung und Gestaltung sowie der Verarbeitung von Tailored Blanks sind außerordentlich vielfältig. Durch gezielte Abstimmung der Eigenschaften und Anforderungen an das Bauteil werden Teile und Komponenten optimal gestaltet. Die wichtigsten Einsatzmöglichkeiten im Karosseriebau zeigt folgende Abbildung (36):

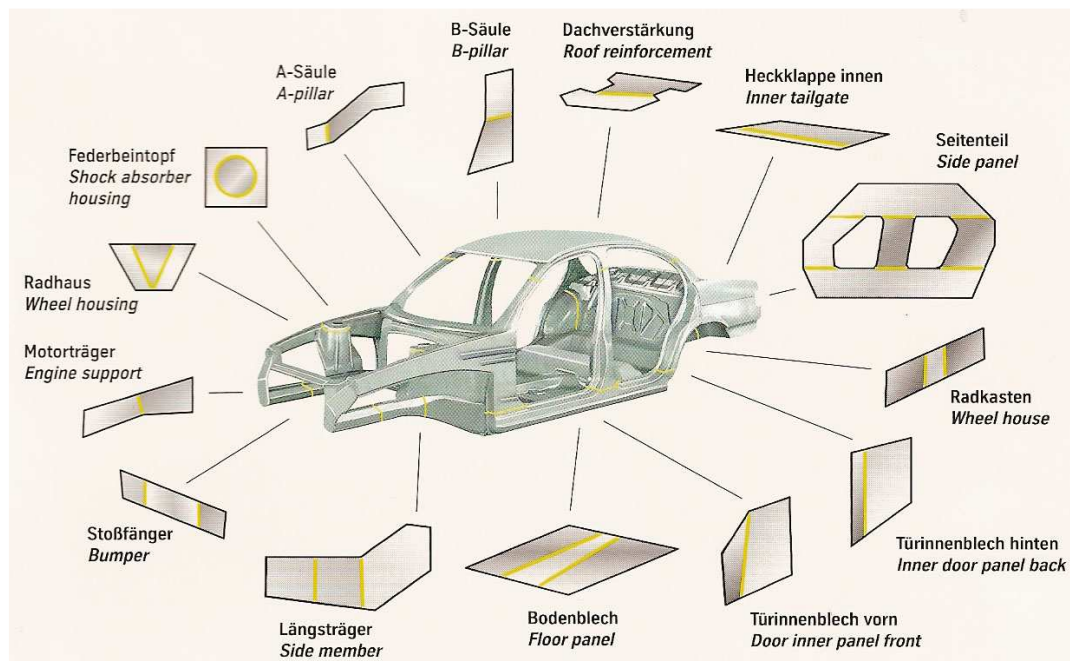


Abb. 36: Einsatzmöglichkeiten von Tailored Blanks im Automobilbau (ThyssenKrupp Tailored Blanks)

Ein Fahrzeug besteht aus einer Vielzahl von Einzelteilen, die zu Untergruppen zusammengefasst werden. Eine solche Untergruppe muss in der Regel verschiedene Anforderungen erfüllen. So soll eine Tür z. B. ein möglichst geringes Gewicht haben - d. h. aus relativ dünnem Blech bestehen, gleichzeitig jedoch eine hohe Steifigkeit im Bereich der Scharniere aufweisen. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden üblicherweise zusätzliche Einzelteile zur Verstärkung an das Türinnenblech angeschweißt. Die Herstellung und Integration solcher Einzelteile verursacht jedoch Kosten, da diese Verstärkungsteile eigens hergestellt und mit der Untergruppe verbunden werden müssen. Da die Kosten für das Halbzeug Tailored Blank geringer ausfallen, als die Herstellung und Verarbeitung zusätzlicher Einzelteile, sinken die Kosten für die gesamte Untergruppe.

Bis heute begrenzt sich die Anwendung von Tailored Blanks fast ausschließlich auf den Fahrzeugbau. Dadurch lehnen sich die Eigenschaften der eingesetzten Stähle auch stark an die in der Automobilindustrie üblichen Anforderungen an. Der Schwerpunkt der Weiterentwicklung von Tailored Blanks konzentriert sich derzeit auf die Optimierung der Prozessgeschwindigkeiten und der Prozessstabilität und auf die Anwendung der noch relativ neuen nichtlinearen Schweißprozesse sowie der Herstellung von Konturenbauteilen. Durch die Wei-

terentwicklung der bisher eingesetzten Prozesse wird sich zukünftig das Einsatzspektrum von Tailored Blanks deutlich vergrößern und auch anderen Anwendungsbereichen zugänglich sein.

## 12.1 Vorteile durch den Einsatz von Tailored Blanks

	<b>PKW-Seitenteile</b> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Entfall von Verstärkungen</li><li>➤ Gewichtsreduzierung</li><li>➤ Verringerung der Teileanzahl</li><li>➤ Erhöhung des Aufprallschutzes durch den Einsatz höherfester Materialien</li><li>➤ Verbesserung der Materialausnutzung durch optimierte Schachtelung</li></ul>
	<b>PKW-Türen</b> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Erhöhung der Steifigkeit, dadurch Entfall von Verstärkungen</li><li>➤ Verbesserung der Einbautoleranzen</li><li>➤ Gewichtsverminderung und Reduzierung von Fertigungsschritten</li></ul>
	<b>Radhäuser</b> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Kosteneinsparung durch Entfall von Punktschweißverbindungen</li><li>➤ Entfall von Abdichtmaterialien und -arbeiten</li></ul>
	<b>Längsträger</b> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Einsparung von Einzelteilen</li><li>➤ Verbessertes Crashverhalten durch Einsatz unterschiedlicher Materialdicken</li><li>➤ Positiv veränderte Verformungseigenschaften im Nahtbereich gegenüber einem punktgeschweißten Träger</li></ul>
	<b>Böden</b> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Erhöhung der Stabilität des Fertigteils</li><li>➤ Einsparung von Überlappverbindungen</li><li>➤ Gewichtsreduzierung</li><li>➤ Abdichtmaterialien und -arbeiten entfallen</li><li>➤ Vorteile im Recyclingprozess</li></ul>

Abb.37: Einsatzgebiete von Tailored Blanks [ThyssenKrupp Tailored Blanks GmbH]

## **13 Vergleich der Schweißverfahren**

Thermische Fügeverfahren haben eines gemeinsam: Sie erzeugen unlösbare Verbindungen. Darüber hinaus unterscheiden sie sich teilweise sehr stark, so dass es eine Herausforderung ist, allgemeine Anwendungsregeln zu formulieren [45]. Bei der wirtschaftlichen Betrachtung der Herstellung von Tailored Blanks werden an dieser Stelle das Hochfrequenzwiderstands-Pressschweißverfahren mit konduktiver Wärmeeinleitung und das Laserstrahl-Schweißverfahren einem Vergleich unterzogen. Die Wahl des bevorzugten Verfahrens hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, so dass über die Kosten des Schweißvorganges allein noch keine Aussage hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit getroffen werden kann. Es kommt vielmehr auf die ganzheitliche Gestaltung der Produktionskette von der Blecherzeugung über die Fertigung bis hin zum maßgeschneiderten Produkt an. Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeiten und Grenzen der jeweiligen Prozesse zu untersuchen, um eine Empfehlung für das jeweils eine oder andere Schweißverfahren geben zu können.

### **13.1 Faktoren für die Wahl des geeigneten Schweißverfahrens**

Bei der Wahl des bevorzugten Schweißverfahrens steht die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund. Für die meisten produzierenden Unternehmen lautet der größte aller Trends, Kosten zu sparen bei hoher Qualität und Funktionalität der Verbindung. Dazu werden Arbeitsgänge optimiert und automatisiert sowie aufwendige Verfahren - wo möglich - durch günstigere ersetzt. [45]. Über die Kosten des Schweißprozesses hinaus sind jedoch vielfältige Faktoren zu beachten, so dass es eine Herausforderung ist, allgemeine Anwendungsregeln zu formulieren. Die wichtigsten Faktoren, die Einfluss auf die Entscheidung für ein Schweißverfahren haben und eine Abgrenzung der Anwendungsbereiche der jeweiligen Schweißprozesse kann nach folgenden Einflussfaktoren (Abb. 38) vorgenommen werden:



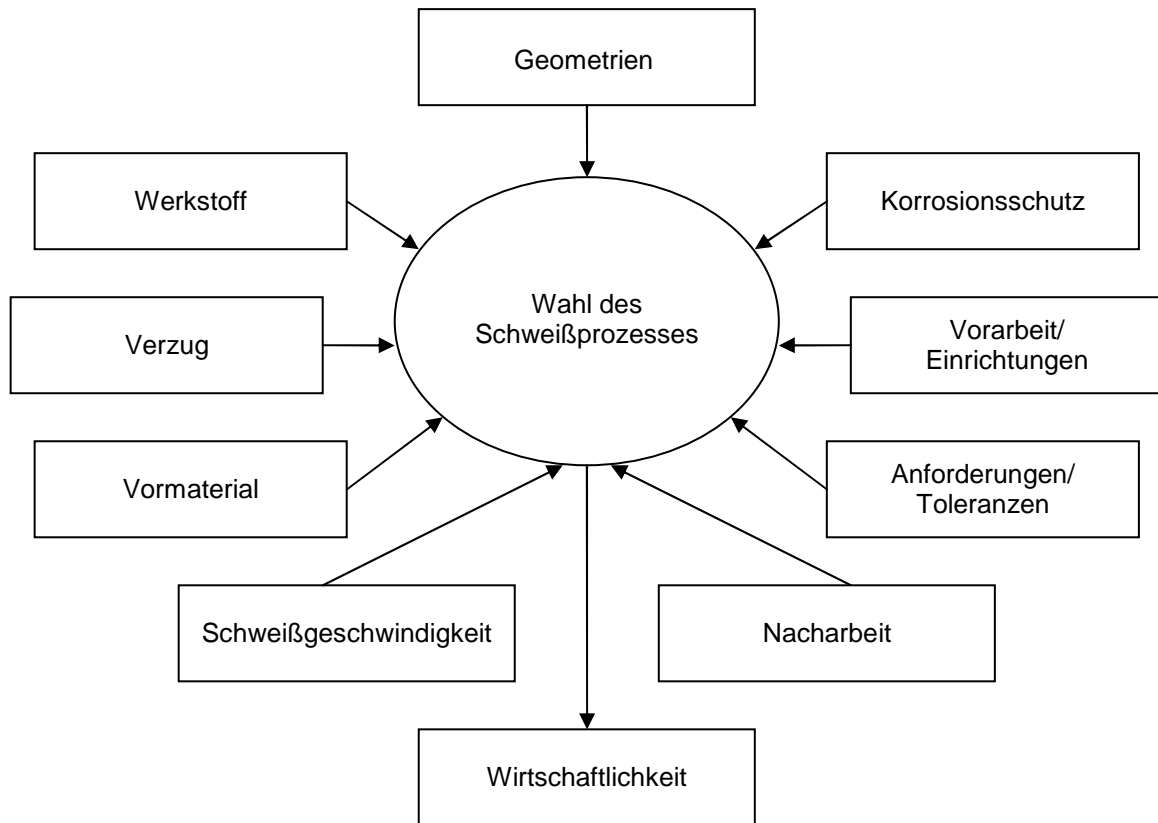


Abb. 38: Auswahlkriterien des Schweißprozesses

Werkstoff:	Welches Verfahren ist für den verwendeten Werkstoff geeignet?
Vormaterial:	Welche Qualität muss das Vormaterial bereits aufweisen, um eine ausreichende Schweißeignung zu gewährleisten?
Vorarbeit:	Wie aufwendig ist es, den Prozess einzurichten?
Toleranzen:	Wie genau können die Teile gefertigt werden?
Geometrien:	Welche Formen sind erzeugbar?
Schweißgeschwindigkeit	Welche Schweißgeschwindigkeiten werden erreicht?
Verzug:	Wie groß ist die Wärmeeinflusszone im Werkstück und die Gefahr des Verzugs?
Nacharbeit	Welchen Umfang an Nacharbeit erfordert das Schweißverfahren?
Korrosionsschutz	Was ist beim Oberflächenbeschichten zu beachten?

### **13.1.1 Werkstoff**

Die Entwicklungen immer neuerer und vor allem höher- und höchstfester Stahlwerkstoffe bedingen Fertigungsverfahren, die den besonderen Herausforderungen dieser Werkstoffe in Bezug auf die Verarbeitung, der Umform- und Füge-technik gerecht werden. So kann es im Hinblick auf die Werkstoffeigenschaften (Festigkeit und Formgebungsvermögen) durchaus sinnvoll sein, ein bisher angewandtes Verfahren zu verlassen und ein anderes anzuwenden.

#### **Hochfrequenzschweißverfahren**

Die Wahl der Werkstoffe und Werkstoffdicken beeinflussen beim CHFW-Prozess zusammen mit der Wahl der Prozessparameter die Wulstdicke, die sich mit dem Stauchprozess bildet und welche ein wesentliches Qualitätsmerkmal der Hf-Schweißnaht ist. Ein zu ausgeprägter Wulst kann sich nachteilig auf den anschließenden Umformvorgang auswirken. Verschiedene Werkstoffe können kombiniert werden, wobei die unterschiedlichen Schmelztemperaturen zu berücksichtigen sind. Ein besonderes Beispiel stellen Stahl-Aluminium-Verbindungen dar. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Schmelztemperaturen müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden, damit eine Verbindung entstehen kann. Eine Einstellung der Füge-temperatur ist beim CHFW-Prozess individuell für jeden Fügepartner getrennt möglich. So eignet sich das Hochfrequenzschweißen in besonderer Weise zum Fügen von Werkstoffen, deren Schmelzpunkt sehr unterschiedlich zueinander ist [38]. Im Allgemeinen eignen sich Pressschweißprozesse aufgrund des Auftretens einer nur geringfügigen flüssigen Phase (keine Schmelze) zum Verbinden von unterschiedlichen Metallen besser, als Schmelzschweißprozesse [14]. Die Kombination von elektrischer und mechanischer Energie zur Erzeugung einer stoffschlüssigen Verbindung erlaubt es, beim induktiven Hochfrequenzschweißen von Aluminiumlegierungen die elektrische Energie zu minimieren und erst unter Anwendung einer erhöhten Stauchspannung die zu fügenden Werkstoffe zu plastifizieren und stoffschlüssig zu verbinden. Die Aufrechterhaltung der Presskraft auch nach dem Schweißvorgang trägt dafür Sorge, dass die Schweißnaht unter einem äußeren Druck erstarrt und die Bildung von Heißrissen vermieden werden kann. [55].

#### **Laserstrahlschweißverfahren**

Bei Stählen hängt die Schweißbarkeit in erster Linie vom Kohlenstoffgehalt ab. Mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt (z. B. bei martensitischen Stählen) verschlechtert sich die Schweißbarkeit und es kommt zu Aufhärtungen und Spannungen in der Schweißnaht, denen man in der Praxis mit Vorwärmen und langsamen Abkühlen der Schweißnaht beim Erstarren der Schmelze begegnet. Nichteisenmetalle sind weniger gut zu schweißen als Stähle. Dies liegt darin begründet, dass diese Legierungen die Laserstrahlung weniger gut absorbieren als dies bei Stählen der Fall ist. Bisher eingesetzte Tailored Blanks aus Aluminium und Stahl besitzen eine überlappende Verbindung im Bereich der Laserschweißnaht. Sie sind aus die-

sem Grunde nicht bleichen und daher nur bedingt im sichtbaren Bereich einer Karosserie einsetzbar. Im Übrigen können sich im Bereich der Fügezone intermetallische Phasen mit hoher Härte und Sprödigkeit bilden, was eine Umformung des Aluminium-Stahl-Tailored Blank erschwert. Die überlappende Fügestelle selbst muss außerdem vor Korrosion geschützt werden [51].

Bei Aluminium und Aluminiumlegierungen muss wegen der dünnflüssigen Schmelze und deren Reaktion mit der umgebenden Atmosphäre mit großer Sorgfalt im Umgang mit Arbeits- und Schutzgasen gearbeitet werden. Eine genaue Zusammensetzung der Gase und deren Strömungsgeschwindigkeiten beim Schweißprozess gewährleisten jedoch gute Schweißnähte. [47] [14].

### 13.1.2 Vormaterial

Die Vielzahl der Werkstoffe und Anwendungen erfordert bereits bei der Vorbereitung eine exakte und individuelle Festlegung der Oberflächenanforderungen und ggf. der notwendigen nachträglichen chemischen oder mechanischen Oberflächenbehandlung. Dabei ist es wichtig, die Kriterien sowohl für die Außen- und Innenoberflächen, als auch für den Schweißnahtbereich zu bestimmen. Je nach Vormaterialauswahl können spezifizierte Oberflächenbeschaffenheiten erreicht werden.

Eine besondere Herausforderung ist das erfolgreiche Fügen von Mischverbindungen aus Aluminium- und Stahlwerkstoffen. Prinzipbedingt entsteht beim Schweißprozess eine intermetallische Phase, die durch hohe Härte und Sprödigkeit gekennzeichnet ist. Die Breite dieser Phase muss auf ein Minimum reduziert werden. Der in der Literatur empfohlene Wert liegt bei 10  $\mu\text{m}$  [54].

### Hochfrequenzschweißverfahren

Das Hf-Schweißen ist prinzipbedingt ein wärmearmes Fügeverfahren. Aufgrund der Möglichkeit, die Wärmeeinbringung für jeden Fügepartner durch geeignete Parameterwahl separat zu steuern (Variation der Ausspannlänge), erleichtert der CHFV-Prozess das Fügen von Mischverbindungen aus Aluminium und Stahl. In entsprechenden Untersuchungsreihen ist es gelungen, die intermetallische Phase, die als wahrscheinlichste Versagensstelle fungiert, auf teilweise unter 2,5  $\mu\text{m}$  zu reduzieren.

In Vorbereitung des CHFV-Prozesses ist bei der Gestaltung der Bauteilhälften bereits die zu erwartende Stauchverkürzung zu berücksichtigen. Diese ist abhängig von der Bauteildicke, der Stauchkraft, dem einwirkenden Wärmeeintrag und dem Versatz. Dabei können unter normaler Prozessführung Verkürzungen von 1 bis zu 3 mm auftreten [38].

### **Laserstrahlschweißverfahren**

Durch werkstoffbedingt stark unterschiedliche Schmelztemperaturen und Bildung intermetallischer Mischphasen, die extrem hart und spröde sind und damit nur geringe Festigkeiten aufweisen, ist die Erzeugung von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen mit dem Laserstrahlschweißverfahren zur Zeit nur mit hohem Aufwand möglich. Zur Vermeidung dieses Nachteils wird ein für beide Werkstoffe kompatibler Zusatzwerkstoff verwendet. Insbesondere eignen sich hierfür Legierungen auf der Basis von Zink, da sie keine intermetallischen Phasen mit Aluminium und Stahl bilden. Jedoch wirkt sich bei diesem Verfahren die niedrige Schmelz- und Siedetemperatur der Zinklegierungen nachteilig aus. Es kommt schnell zu einer Überhitzung der Schmelze, verbunden mit einer starken Oxidation (Nahtaussehen) und zu ihrem Verdampfen [56]. Die für industrielle Anwendungen notwendige Prozesssicherheit ist daher für das Fügen von Aluminium-Stahl-Mischverbindungen derzeit noch nicht gewährleistet. Die bisher bekannten, lasergeschweißten Tailored Blanks aus Aluminium und Stahl besitzen eine überlappende Fügeverbindung im Bereich der Schweißnaht. Sie sind damit nicht blecheben und aus diesem Grunde nur bedingt für Außenhautteile geeignet [51]

In Vorbereitung auf den Laserstrahlschweißprozess kommt es im Übrigen auf die Sauberkeit der Oberfläche des Werkstücks an, um eine fehlerfreie Schweißnaht zu erreichen. Die hohen Genauigkeitsanforderungen bedingen eine exakte Vorfertigung und Nahtvorbereitung. Stark gefettete oder verschmutzte Oberflächen müssen vorher sorgfältig gereinigt werden. Eine gute Schweißbarkeit lässt sich bei Werkstücken mit leicht geölter Oberfläche in Verbindung mit geeigneten Schweißparametern erzielen. Bleche die eine Zunder-, Lack-, Rost- oder Eloxalschicht haben, sind mit dem Laserstrahl nicht schweißbar [47].

### **13.1.3 Vorarbeit**

Die Vorbereitung der Schweißnaht ist in Abhängigkeit vom Schweißverfahren, der Blechdicke und der Schweißposition festzulegen. Zur Nahtkantenvorbereitung werden mechanische oder thermische Trennverfahren angewendet. Die mechanische Bearbeitung erfolgt z. B. durch Sägen, Scheren, Fräsen, Hobeln oder Schleifen. Als thermisches Bearbeitungsverfahren kommen das Plasmaschneiden oder das Laserstrahlschneiden in Betracht. Bei thermisch geschnittenen Nahtflanken ist es häufig notwendig, diese vor dem Schweißen leicht zu überschleifen, um noch vorhandene Oxidreste oder Grate zu beseitigen [20].

### **Hochfrequenzschweißverfahren**

Da es sich beim Hochfrequenzschweißen und ein Pressschweißverfahren handelt, ist in Bezug auf die Nahtvorbereitung der Fügeteile oder Blechzuschnitte nur eine sehr zeit- und kostengünstige Schweißnahtvorbereitung, z. B. Säge- oder Tafelscherenschnitt sowie eine geringe Positionierungstoleranz erforderlich [16]. Voraussetzung ist jedoch eine geeignete

Konstruktion des Schweiß- und Spannwerkzeuges, das eine schlechte Bauteilvorbereitung sowie Geometrietoleranzen ausgleichen und trotzdem eine reproduzierbare, vollständige Verschweißung der Werkstücke gewährleisten muss [16]. Zur Positionierung des Werkstückes dienen üblicherweise die Spannwerkzeuge, die gleichzeitig Stromkontaktelemente sind. Außerdem besteht die Möglichkeit einer exakten Ausrichtung der Werkstücke durch eine zusätzliche Positioniereinrichtung. Durch den Stauchvorgang des Hf-Prozesses werden Unebenheiten und Verunreinigungen aus dem Fügebereich herausgedrückt. Daraus resultiert ein verhältnismäßig geringer und kostengünstiger apparativer Aufwand. Die Stauchverkürzung ist bereits bei der Planung zu berücksichtigen [38], [16].

Die prozessbedingt entstehende Wulstbildung ist ein entscheidendes Qualitätskriterium der Hf-Naht. Aus diesem Grunde sind die Prozessparameter werkstoffgerecht zu ermitteln. Ist der Wärmeeintrag zu hoch, kann es durch das Aufschmelzen der Fügekanten zur Tropfenbildung kommen. Dies hätte eine ungleichmäßige oder übermäßige Stauchwulstausprägung zur Folge. Nachfolgende Umformarbeiten würden dadurch erschwert oder sogar unmöglich. Eine für die Umformung noch zu akzeptierende Dicke (max. 40 % Nahtüberhöhung) und gleichmäßige Nahtausbildung ist durch entsprechende Anpassung der Prozessbedingungen an den Werkstoff erreichbar [16].

### **Laserstrahlschweißverfahren**

An die Qualität der Nahtvorbereitung von Laserschweißnähten werden höhere Anforderungen gestellt, als dies für den CHFW-Prozess erforderlich ist. Die zu fügenden Teile und die Auftrefffläche des Laserstrahls müssen eben, frei von Verunreinigungen und anhaftenden Korrosionsschutzmitteln, glatt und frei von Kerben sein. Die in der Blechverarbeitung üblicherweise eingesetzten Rollen- oder Tafelscheren sind daher für den Laserschweißprozess weniger geeignet. Neben einer exakten Nahtvorbereitung ist es wichtig, die zu fügenden Teile präzise auszurichten und zu positionieren. Nicht parallele Schnittkanten oder Grate können das Schweißergebnis negativ beeinflussen bzw. die Bauteile unbrauchbar machen. Daher ist die Vorbereitung der Werkstücke und das Positionieren beim Laserstrahlschweißen vergleichsweise aufwendig. [17]. Neben einer konventionellen Spanntechnik zum Halten und Grobpositionieren der Werkstücke werden zur präzisen Positionierung des Laserstrahls und zum Toleranzausgleich Sensoren und Nahtfolgesysteme eingesetzt.

### **13.1.4 Toleranzen**

#### **Hochfrequenzschweißverfahren**

Beim Hf-Schweißen gestaltet sich die Vorbereitung der Bleche problemlos, da durch die prozessbedingte Aufstauchung und das zeitgleiche Fügen über die gesamte Schweißnahtlänge auch größere Toleranzen ausgeglichen werden können. Die maximale Spaltbreite beträgt 3 bis 5 mm abhängig von der Blechdicke [38]. Bei der Qualität der Zuschnitte von Blechen

und beim Gesamtaufwand in der Schweißvorbereitung können mit diesem Verfahren Zeit und Kosten gespart werden.

### Laserstrahlschweißverfahren

Das Verbinden von Platinen zum Herstellen von Tailored Blanks erfordert beim Laserschweißen sehr präzise geschnittene Bleche, da in der Regel nur Fügespalten bis 0,1 Millimeter erfolgreich mit dem Laser ohne Zusatzwerkstoff zu schweißen sind. Die Stoßkanten sollten bündig aneinander liegen. Die Rauheit darf nicht größer sein als die Spaltbreite. Die maximale Breite des Fügespalt ist abhängig von der Schweißgeschwindigkeit und der Einschweißtiefe. Beträgt die Lücke zwischen zwei zu verschweißenden Teilen mehr als 5 % ihrer Dicke, ist Zusatzwerkstoff (Fülldraht) erforderlich [48]. Die verfahrenstypischen Nachteile des Laserschweißprozesses können durch Verwendung der Laser-MSG-Hybridtechnik teilweise aufgehoben werden. So kann die Spaltüberbrückbarkeit drastisch erhöht werden.

#### 13.1.5 Geometrien

Grundsätzlich ist sowohl mit dem Laser als auch mit der Hochfrequenzschweißtechnik eine Vielzahl von Bauteilen, wie sie z. B. in der Automobilindustrie zum Einsatz kommen reproduzierbar zu fügen. Angefangen von Werkstücken mit linearem und nicht linearem Nahtverlauf, bis hin zu 2D- und 3D-Konturen. Neben Blechen gleicher Werkstoffspezifikation und unterschiedlicher Materialstärke werden auch Bleche mit verschiedenen Werkstoffspezifikationen und Materialstärken zu Tailored Blanks verbunden (Abb. 39) [51].

Im Falle von Konturschweißungen wird die Schweißmöglichkeit in der Lasertechnik durch anlagenspezifische Komponenten (z. B. mit Bewegungsachsen, einer beweglichen Optik, Industrieroboter etc. und vor allem durch eine auf das Bauteil abgestimmte Spanntechnik) realisiert.

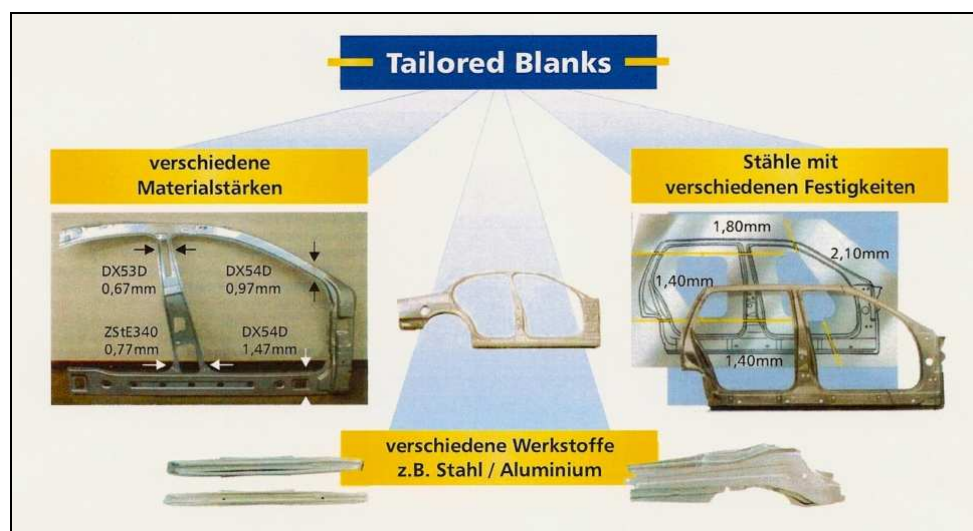


Abb. 39: Schweißbare Werkstoffe (Thyssen Krupp Steel)

### **Hochfrequenzschweißverfahren**

Das Hochfrequenzschweißen von Konturbauteilen erfordert im Gegensatz zum Schweißen von linearen Fügeaufgaben, welche mit einfacher Spanntechnik erfolgen können, bauteil-spezifische Schweiß- und Spannwerkzeuge. Diese müssen konturenangepasst parallel zum Bauteil entwickelt werden. Dieser erhöhte Aufwand wirkt sich wirtschaftlich ungünstig auf Produktveränderungen aus. Bei der Gestaltung der Werkzeuge sind die Anforderungen der Positionierung, des Fixierens, der Zuführung der Bauteile und die Stromführung der Form entsprechend konstruktiv zu lösen. Die Geometrie der Bauteile muss einen Stromfluss durch den schweißnahtnahen Bereich zulassen. Die Verschweißung unterschiedlicher Blechbreiten und die variable Positionierung der Fügekanten sind unter den Bedingungen des Hf-Prozesses möglich. Die maximale Schweißnahtlänge beträgt 2000 mm. Dadurch sind im Karosseriebau Platinen für Bodengruppen, Seitenteilen und Türen herstellbar. Vorteilhaft ist, dass enge Konturen, Radien und Formen keinen Einfluss auf die hohe Schweißgeschwindigkeit des Hf-Prozesses haben [38].

### **Laserstrahlschweißverfahren**

Für lineare Fügeaufgaben genügen Laserschweißanlagen mit nur einer Bewegungsachse. Dabei wird entweder das Werkstück oder die Bearbeitungsoptik bewegt [49]. Die Fertigung nicht linearer Tailored Blanks mittels Laserschweißen erfolgt unter Verwendung verschiedener Handhabungssysteme und Technologien. Zum Beispiel werden im Stumpfstoß aneinander gelegte Einzelbleche auf Spannvorrichtungen, die auch für dieses Verfahren bedarfsgerecht konstruiert werden müssen, unter einem Laserschweißportal hindurch geführt. Hierbei muss das gesamte Portalgewicht bewegt werden, so dass es teurer Steuerungs- und Regelsysteme bedarf. Eine preisgünstigere Lösung ist der Einsatz von Industrierobotern in Verbindung mit einer elektronisch gesteuerten Laserschweißoptik (Scannerspiegel) mit Nahtverfolgungssensor, die den Laserstrahl punktgenau auf der Schweißposition hält [21]. Die schnelle Bewegung des Scanners erlaubt beliebige Schweißkonturen und eine hohe Auslastung des Lasers, während der Roboter eine ruhige, kontinuierliche Bewegung ausführt.

## **13.1.6 Schweißgeschwindigkeit**

### **Hochfrequenzschweißverfahren**

Die extrem kurzen Schweißzeiten des CHFW-Prozesses tragen den Forderungen der Platinenindustrie nach kürzeren Prozesszeiten zur Reduzierung der Kosten bei der Herstellung von Tailored Blanks in besonderer Weise Rechnung. Der Wirkungsgrad ist hoch und der Energieverbrauch gering. Beispielsweise können mit einer installierten Leistung von 160kVA, was einem ND:YAG Festkörperlaser mit einer Ausgangsleistung von 3 kW entspricht, in Abhängigkeit von Werkstoff, Bauteilform und Blechdicke mit diesem Verfahren Schweißzeiten von 1 Sekunde pro 1 Meter Naht erreicht werden [27].

### **Laserstrahlschweißverfahren**

Die Laserleistung muss an die Dicke des Werkstücks angepasst werden. Je größer die Materialdicke, umso höher die benötigte Laserleistung. Mit höheren Laserleistungen können auch größere Einschweißiefen und höhere Geschwindigkeiten erzielt werden. Hohe Schweißgeschwindigkeiten führen zu schlanken, aber weniger tiefen Schweißnähten. Zusätzlich kann mit der Schweißgeschwindigkeit das Nahtgefüge positiv beeinflusst werden. Dies ist dann wichtig, wenn Werkstoffe geschweißt werden, deren Schmelze beim Erstarren zur Aufhärtung oder verstärkt zu Rissen neigt [48]. Die Schweißgeschwindigkeiten werden von der Laserleistung, der Materialkombination, der Geometrie und dem Lasertyp beeinflusst. So ergeben sich unterschiedliche Absorptionen je nach Wellenlänge des Lasers. Typische Schweißgeschwindigkeiten bei Einschweißiefen von 1, 3, 6 mm liegen bei 14, 6 und 2 m/min (Edelstahl, CO<sub>2</sub>-Laser, 3,5 kW) [32].

### **13.1.7 Verzug**

#### **Hochfrequenzschweißverfahren**

Mit Verzug und Eigenspannungen ist nach dem Hf-Schweißen weniger als bei Schmelzschweißprozessen zu rechnen, da das Fügen der Naht zeitgleich stattfindet, die Wärmezufuhr relativ gering ist und homogen eingebracht wird, so dass die Schmelztemperatur des Bauteilwerkstoffes nicht erreicht wird. Dadurch kommt es auch bei höher festen Stählen nur zu einer geringen Beeinflussung der benachbarten Gefügebereiche. Somit stellt sich in Hf-Schweißnähten ein flacher Härtegradient und ein sehr gleichmäßiger Härteverlauf ohne starke Schwankungen ein. Im Vergleich zu Schmelz- oder Strahlschweißverfahren werden deutlich geringere Spitzentemperaturen und längere Abkühlzeiten erreicht. Verfahrensbedingt nimmt jedoch die Breite der Wärmeeinflusszone zu. Zusätzlich können unterschiedliche Verfestigungsmöglichkeiten und eine Verbesserung der Strukturfestigkeit, insbesondere im Zusammenhang mit der Verarbeitung hochfester Stähle, unter Anwendung einer prozessintegrierten Wärmebehandlung erfolgen [38].

### **Laserstrahlschweißverfahren**

Aufgrund der konzentrierten Energieeinbringung durch das Laserstrahlschweißen kommt es zu extrem hohen Abkühlgeschwindigkeiten im Werkstoff. Dies kann insbesondere bei höherfesten Stählen zu unzulässigen Aufhärtungen, Heißrissen, Schweißesigenspannungen und Verzug führen. Die Bruchdehnung und der Tiefziehkennwert sind dadurch deutlich geringer als beim unverschweißten Werkstoff. Allerdings sind die Bereiche maximaler Härtewerte auf die schmale Wärmeeinflusszone beschränkt. Aus diesem Grunde belasten Sie das Bauteil nur geringfügig. Um eine hohe Schweißnahtqualität zu erreichen, ist es wichtig, das Werk-



stück möglichst wenig zu erwärmen bzw. die eingebrachte Wärme durch gekühlte Vorrichtungen schnell abzuleiten. Um die Auswirkungen der raschen Abkühlung abzumildern, werden die Laserstrahlschweißnähte auch durch kurze, örtlich begrenzte induktive Nachwärmung behandelt. Dadurch ist eine Härteminderung sowie Duktilitätssteigerung des Schweißnahtgefüges zu erreichen. Außerdem kann durch den Einsatz von Schweißzusatzwerkstoffen mit geringem Kohlenstoffgehalt die Legierung des Grundwerkstoffes positiv beeinflusst werden.

### **13.1.8 Nacharbeit**

Zur Erzielung bester Korrosionsbeständigkeit ist es erforderlich, die Schweißnähte und die beeinflussten Zonen grundsätzlich von Schlackenresten, Schweißspritzern, Anlauffarben oder anderen Oxidationsprodukten zu reinigen. Die Behandlung kann durch Bürsten, Schleifen, Polieren, Strahlen oder Beizen erfolgen. Je feiner und glatter die Oberfläche, desto größer ist die Korrosionsbeständigkeit [20].

### **Hochfrequenzschweißverfahren**

Prozessbedingt bildet sich bei Hf-Schweißungen ein Stauchwulst, der in einem separaten Arbeitsschritt abgearbeitet werden muss, falls die Schweißnaht des fertigen Bauteils in der späteren Verwendung im sichtbaren Bereich liegt. Dies erhöht die Kosten in der Produktion und schränkt den Einsatz des Verfahrens ein. Da viele Blechhalbzeuge für die Verwendung in der Verkehrstechnik (PKW-, LKW-, Schiff- oder Flugzeugbau) auch im nicht sichtbaren Bereich liegen, kann aus Gründen der Kosten- und Zeitersparnis auf die Abarbeitung des Stauchwulstes in bestimmten Fällen verzichtet werden, soweit dies tolerierbar ist.

Zur Beeinflussung und Verbesserung der Strukturfestigkeit von hochfesten, durch den Schweißprozess lokal beeinflussten Werkstoffen bietet der Hf-Prozess durch Integration einer thermo-mechanischen Behandlung (Hochfrequenzerwärmungstechnik) die Möglichkeit, unterschiedliche Verfestigungen je nach verwendetem Werkstoff durch die Wahl verschiedener Zeit-Temperaturzyklen zu erzielen [54].

### **Laserstrahlschweißverfahren**

Durch die lokal begrenzte Wärmezufuhr beim Laser-Schweißvorgang zeichnen sich die Schweißnähte durch eine schmale Nahtgeometrie aus, die wenig oder gar keine Nacharbeit erfordert. Insbesondere bei hybridgeschweißten Nähten entfällt durch geringeren Spritzerauswurf der Aufwand für kostspielige Nacharbeiten. Zur Nachbehandlung der Schweißnaht enthalten Laseranlagen Polierrollen oder Einrichtungen zum Nachglühen. Die thermische Nachbehandlung kommt insbesondere bei der Verwendung von hochfesten oder empfindlichen Stahlsorten zum Einsatz. Aufgrund der beim Laserstrahlschweißen auftretenden

großen Temperaturgradienten und der geringen Austenitisierungsdauer treten in diesen Werkstoffen oftmals hohe thermische Spannungen auf, die zu Heißrissen und mangelnder Festigkeit im Schweißnahtbereich führen können. Mit einer lokalen Wärmenachbehandlung durch eine dem Laserprozess angepasste Zusatzenergiequelle wird durch Verlängerung der Abkühlzeit und Anlassen des Schweißnahtgefüges eine Härteminderung und Duktilitätssteigerung erzielt.

### **13.1.9 Korrosionsschutz**

#### **Hochfrequenzschweißverfahren**

Beim CHFV-Prozess ist die Verschweißung von beschichteten Blechen ohne zusätzliche Anlagenmodifikationen möglich. Die Schweißparameter sind mit den Werten für unbeschichtete Bleche identisch. Ein Abtrag der Zinkschicht wird maßgeblich von der eingebrachten Wärmemenge beeinflusst. Im Hf-Prozess wird die Oberflächenschicht des Werkstoffes nur in Teilbereichen abgetragen. Die Schweißparameter können so eingestellt werden, dass eine durchgängige Zinkschicht bis in den Wulstbereich nachweisbar ist [38].

#### **Laserstrahlschweißverfahren**

Ein Problem beim Laserstrahlschweißen ist, dass Zink unter dem Laserstrahl schneller verdampft als Stahl schmilzt. Um Löcher in der Schweißnaht zu vermeiden ist es wichtig, das Zinkgas möglichst schnell abzuleiten. Daher ist es üblich, den Schweißspalt während des Schweißprozesses minimal geöffnet zu halten. Dies erfordert jedoch eine präzise und aufwendige Anlagentechnik [42]. Eine Alternative dazu ist eine neu entwickelte Beschichtung, bei der auf die Zinkschicht noch eine geringe Menge Magnesium aufgedampft wird. Hierdurch verbessert sich die rostschützende Wirkung der Zinkschicht so vorteilhaft, dass ein Überzug von 3,5 µm ausreicht. Die so reduzierte Zinkgasfreisetzung kann durch die Kapillare entweichen. Der Aufwand in der Produktionstechnik kann so reduziert und die Wirtschaftlichkeit gesteigert werden [42]. Für die Zukunft sind für beschichtetes Stahlfeinblech gezielte Optimierungen wahrscheinlicher als grundsätzlich neue Metallüberzüge. Dabei ist der Trend zu geringeren Schichtdicken bereits vorhanden um der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit besser zu entsprechen.

## 13.2 Arbeitssicherheit und Schutzmaßnahmen

### Hochfrequenzschweißverfahren

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass hochfrequente, elektromagnetische Wellen elektronische Körperhilfen (Implantate) z. B. Herzschrittmacher, Insulinpumpen etc. beeinflussen. Im Falle der Herzschrittmacher könnte eine Fehlfunktion lebensgefährliche Folgen haben. Daher ist es Vorschrift, entsprechend deutlich sichtbare Warnhinweise (Warnschilder) an den relevanten Komponenten der Hochfrequenzschweißanlage (Generator) anzubringen. Im Übrigen sind alle Schutzmaßnahmen und Vorschriften zu beachten, die im Zusammenhang mit einer Schweiß Tätigkeit befolgt werden müssen (Schutzbekleidung, Schutzbrille, Arbeitshinweise etc.).

### Laserstrahlschweißverfahren

Die extrem großen Leistungsdichten der Laserstrahlung von bis zu  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> beim Nd:YAG-Laser bzw.  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> beim CO<sub>2</sub>-Laser (zum Vergleich Sonnenlicht 102 W/cm<sup>2</sup>) bedeuten eine akute Verbrennungsgefahr. Aber auch weit weniger intensive Laserstrahlung stellt für das menschliche Auge eine große Gefährdung dar. Diese ist umso größer, da vielfach die Wellenlängen der verwendeten Laser außerhalb des sichtbaren Lichtspektrums liegen. Auch mit Hilfe anderer Sinnesorgane ist die Laserstrahlung nicht feststellbar und noch weniger ihre Qualität (Intensität, Frequenz). Es kann zu Verbrennungen von Haut und tiefer gelegenen Geweben in dem Grad von schwacher Rötung über Blasenbildung bis zur Verkohlung kommen.

Je nach Grad der Gefährdung, die von einem Laser ausgehen kann, unterscheidet man 5 verschiedene Gefahrenklassen (Tab. 3). Die Einstufung erfolgt durch den Hersteller und zieht für Hersteller und Betreiber besondere Konsequenzen (Sicherheitsmaßnahmen) nach sich [17].

<b>Klasse 1</b>	Eigensichere und wegen des technischen Aufwandes sichere Laser (ungefährlich für das menschliche Auge)
<b>Klasse 2</b>	Laser mit niedriger Leistung und sichtbarer Laserstrahlung, Leistung unter 1 mW (ungefährlich für das menschliche Auge bei kurzzeitiger Exposition durch Lidschlussreflex, Blick in den Strahl bis zu 0.25 Sek.)
<b>Klasse 3A</b>	Kontinuierlich strahlende Laser mit Leistungen unter 5 mW (ungefährlich für das menschliche Auge bei Bestrahlungszeiten bis zu 0.25 Sek, allerdings gefährlich bei optischen Instrumenten, die den Strahlungsdurchmesser verkleinern)
<b>Klasse 3B</b>	Sichtbare und/oder unsichtbare Laserstrahlung mit Leistungen unter 0.5 W bzw. Bestrahlungsstärken unter $10^5$ J/m <sup>2</sup> für gepulste Laser /gefährlich für das menschliche Auge und in besonderen Fällen für die Haut)
<b>Klasse 4</b>	Hochleistungslaser über 0.5 W (sehr gefährlich für das menschliche Auge und gefährlich für die menschliche Haut, Brandgefahr).

Tab. 3: Einteilung der Laserstrahlquellen in verschiedene Gefahrenklassen [17]

Prinzipiell sind die Vorschriften so aufgebaut, dass Laser höherer Leistungsklassen durch Abschirmung, Absicherung und Kennzeichnung dem eigensicheren Laser der Klasse 1 entsprechen. Zur Abgrenzung des Laserbereichs der Klasse 1 reicht eine Kennzeichnung auf dem Gerät. Bei Lasern der Klassen 2 und 3A ist der Strahlweg deutlich und dauerhaft zu kennzeichnen. Bei Lasern der Klasse 4 ist der Arbeitsbereich abzugrenzen und zu kennzeichnen.

Zum Schutz vor Laserstrahlung dienen folgende in Tabelle 4 dargestellte Maßnahmen:

*	Sicherheits- maßnahmen	Klasse 1  sicher	Klasse 2 nur im sichtbaren, Lidschlussreflex Als Sicherheit	Klasse 3A nur im sichtbaren, in den Strahl blicken gefährlich	Klasse 3B direkter Strahl und spiegelnder Reflex gefährlich	Klasse 4 bereits diffuser Reflex gefährlich
A	Schutz- verriegelung		Möglichst so anwenden, dass die Grenzwerte der Klasse 1 unterschritten werden			
A	Fernbedienung			Muss wirksam werden, wenn durch die Abnahme von Verkleidung Strahlungsstärken größer als Klasse 1 frei werden. Überbrückung deutlich anzeigen		
A	Schlüsselschalter				Wo immer möglich einsetzen	
A	Emmissions- anzeige			Nur Personen, die im Laserbereich arbeiten dürfen, erhalten einen Schlüssel		
A	Strahlschalter			Senkt die abgegebene Strahlung auf Werte der Klasse 1		
A	Lage der Bedienelemente		Bedienung darf auf keinen Fall im Strahlengang erfolgen			
A	Beobachtungs- optiken		Sperrfilter nur bei Dauergebrauch	Sperrfilter müssen sicherstellen, dass Bestrahlung über der Klasse 1 nicht auftritt		
A	Wirksamkeits- kontrolle			Das Vorhandensein und die Wirksamkeit der Schutzvorrichtungen muss deutlich angezeigt werden		
A	Laserbereich			Kennzeichnung der Begrenzungen		
B	Betriebsanzeige			Akustische und optische Anzeige an den Zugängen		
B	Wände			Matte, diffus reflektierende, helle Anstriche		
B	durchsichtige Abschirmungen			hohe Absorption der Laserstrahlung, schwer entflammbar		
B	Elektro- installation			hinreichende Anzahl von Not-Aus-Schalter		
B	Lichtinstallation			großzügig, regelbar		
B	Laserschutz- brillen		notwendig, falls Beobachtungsdauer > 0,25 s	unbedingt erforderlich		
O	Justierbrillen			mit Einschränkung verwendbar		
O	Hilfsmittel für die Sichtbarmachung des Strahlweges			Verwendung empfohlen		
O	Schutzkleidung					
O	Regelmäßige Unterweisung in Sicherheitsfragen					Notwendig bei diesbezüglicher Gefährdung
O	Zugangs- Beschränkung			Warnschilder an den Zugängen; Schlüssel für Zugänge nur an ausgebildetes Personal		
O	Laserschutz- beauftragter				schriftlich bestellen	
O	mediz. Eignungs- Untersuchung und Kontrolle				notwendig	

\* A: Apparative Vorkehrungen an der Anlage  
B: Bauliche Vorkehrungen  
O: Organisatorische Maßnahmen

Tab. 4: Sicherheitsmaßnahmen für Laserschweißanlagen [17]

## 14 Durchführung der Schweißversuche und Prüfverfahren

### 14.1 Versuchswerkstoffe und Probengeometrie

Für die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen Versuchsschweißungen wurden die Werkstoffe DC05 (DX54, 1.0312) mit einer Blechdicke von  $t=1,5\text{mm}$  (elektrolytisch verzinkt) und DP600 (HCT600X, 1.0941) mit einer Blechdicke von  $t=1\text{mm}$  (feuerverzinkt) eingesetzt und in Anlehnung an typische Fügesituationen im Fahrzeugbau als I-Naht im Stumpfstoß miteinander verschweißt. Die Auswahl der Werkstoffe erfolgte ebenfalls unter dem Kriterium der industriellen Relevanz. Die verwendeten Platinen in den Abmessungen  $145 \times 140\text{mm}$  wurden entlang der  $140\text{mm}$  in Walzrichtung miteinander verschweißt.

Folgende Tabelle (5) gibt eine Übersicht der mechanisch-technologischen Eigenschaften der verwendeten Stahlgüten:

Werkstoff	$R_e$ : max. Streckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ : Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_{80}$ Bruchdehnung [%]	r min. Maß für Anisotropie	n [%] min. Verfestigungs- exponent
DC05	140 - 190	270 - 330	39	1,9	0,190
DP600	330 - 410	600 - 700	21	0,98	0,14

Tab. 5: Mechanisch-technologische Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe

Die Berechnung des Kohlenstoffäquivalentes ( $C_{eq}$ ) erfolgt nach Gleichung 1 (Kap. 6) und ist in der nachfolgenden Tabelle (6) dargestellt:

Werkstoff	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Al [%]	Cu [%]	N [%]	Mo [%]	V [%]	$C_{eq}$ [IIW]
DC05	0,0343	0,0127	0,1795	0,0203	0,0363	0,0392	0,0122	< 0,0240	0,0032	< 0,0010	0,0724
DP600	0,1356	0,2285	1,574	0,623	0,0512	0,0194	0,0355	> 0,0240	0,0047	0,0334	0,5359

Tab. 6: Kohlenstoffäquivalent der untersuchten Werkstoffe

Der Tiefziehstahl DC05 verfügt über ein hohes Dehnungsvermögen bei einer hohen Gleichmaßdehnung und zeichnet sich zudem durch eine geringe Rückfederung aus. Aufgrund dieser Eigenschaften, die eine hohe Formgenauigkeit gewährleisten, findet der DC05 in erster Linie Anwendung im automobilen Karosseriebau. Darüber hinaus begrenzt das niedrige Kohlenstoffäquivalent von CE (IIW) 0,06 die Aufhärtung, die sowohl beim Laserstrahl- als auch beim HF-Schweißen aus den hohen Abkühlgeschwindigkeiten resultiert.

Die Analyse der chemischen Zusammensetzung der Probe des Tiefziehstahls DC05 ist in nachfolgender Tabelle (7) dokumentiert:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Al [%]	Co [%]	Cu [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]
0,0343	0,0127	0,1795	0,0097	0,0045	0,0392	0,0032	0,0363	0,0392	< 0,0050	0,0122	0,0023	< 0,0010	< 0,0010
W [%]	Pb [%]	Sn [%]	As [%]	Zr [%]	Ca [%]	Ce [%]	Sb [%]	Te [%]	Ta [%]	B [%]	Zn [%]	N [%]	Fe [%]
< 0,0100	< 0,0020	0,0019	0,0025	< 0,0010	0,0003	< 0,0020	< 0,0020	0,0026	< 0,0050	0,0001	0,0163	> 0,0240	99,6

Tab.7: Analyse der chemischen Zusammensetzung der Probe des DC05

Bei dem Werkstoff DP600 handelt es sich um einen Dualphasenstahl mit einer ferritischen Matrix, in der kleine Martensitinseln eingelagert sind. Die Kombination dieser beiden Phasen führt zu einem guten Verhältnis von hoher Zugfestigkeit (Martensit) bei gleichzeitig gutem Dehnungsvermögen (Ferrit). Diese besondere Eigenschaft ist darauf zurückzuführen, dass sich Verformungen im Ferrit konzentrieren, während es aufgrund des weitgehend unverformten Martensits zur Bildung von Versetzungen und somit zu einer hohen Verfestigung kommt [28].

Die Analyse der chemischen Zusammensetzung der Probe des Dualphasenstahls DP600 ist in nachfolgender Tabelle (8) dokumentiert:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Al [%]	Co [%]	Cu [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]
0,1356	0,2285	1,574	0,0124	< 0,0020	0,0623	0,0047	0,0512	0,0194	0,0123	0,0355	0,0037	0,0025	0,0334
W [%]	Pb [%]	Sn [%]	As [%]	Zr [%]	Ca [%]	Ce [%]	Sb [%]	Te [%]	Ta [%]	B [%]	Zn [%]	N [%]	Fe [%]
< 0,0100	< 0,0020	0,0025	0,0042	0,0016	0,0021	< 0,0020	< 0,0020	0,0034	< 0,0050	0,0001	0,0114	> 0,0240	97,2

Tab. 8: Analyse der chemischen Zusammensetzung der Probe des DP600

## 14.2 Eingesetzte Anlagentechnik

Im Rahmen der Schweißversuche an den Blechplatinen kommt ein Nd:YAG-Festkörperlaser (Stablaser) mit einer Ausgangsleistung von  $P_L$  4 kW der Firma Trumpf, Ditzingen, (Abb. 40) sowie eine Schweißanlage zum induktiven Hochfrequenzschweißen mit einer Nennleistung von 85 kW und einer Anschlussleistung von ca.160 kVA der Firma KUKA, Augsburg, zum Einsatz.

Der Festkörperlaser kann sowohl im kontinuierlichen, als auch im gepulsten Betrieb eingesetzt werden. Die Handhabung erfolgt mit einer dreiachsigen, CNC-gesteuerten Vorrichtung. Mit Hilfe eines im Schweißkopf integrierten Crossjet wird die Laseroptik vor Schweißrauch und Verunreinigungen geschützt.



Abb. 40: Laserschweißanlage Nd:YAG-Festkörperlaser [Trumpf]

### 14.2.1 Technische Daten der Laserstrahlschweißanlage

<b>Nd:YAG-Festkörperlaser</b>	Stablaser, lampengepumpt
<b>Bezeichnung:</b>	Trumpf HL 4006 D
<b>Leistung/Pulsenergie:</b>	4000 W (cw/pw)
<b>Strahlführung:</b>	über Lichtwellenleiter
<b>Durchmesser des Lichtwellenleiters</b>	600 $\mu\text{m}$
<b>Frequenz der emittierten Laserstrahlung:</b>	1064 nm
<b>Fokussieroptik:</b>	
• <b>Brennweite der Kollimierlinse:</b>	$f_K = 200 \text{ mm}$
• <b>Brennweite der Fokussierlinse:</b>	$f_F = 200 \text{ mm}$
• <b>Abbildungsverhältnis:</b>	1:1
• <b>Fokusedurchmesser:</b>	$d_F = 600 \mu\text{m}$
<b>Schutz der Optik:</b>	Crossjet und auswechselbares Schutzglas
<b>Werkzeug-/Werkstückführung:</b>	CNC-gesteuerte Dreiachs-Linearverfahrenheit
• <b>Arbeitsbereich:</b>	500 mm x 2000 mm x 300 mm
• <b>max. Verfahrensgeschwindigkeit:</b>	15 m/min

Tab. 9: Technische Daten der Laserstrahlschweißanlage (LZH)

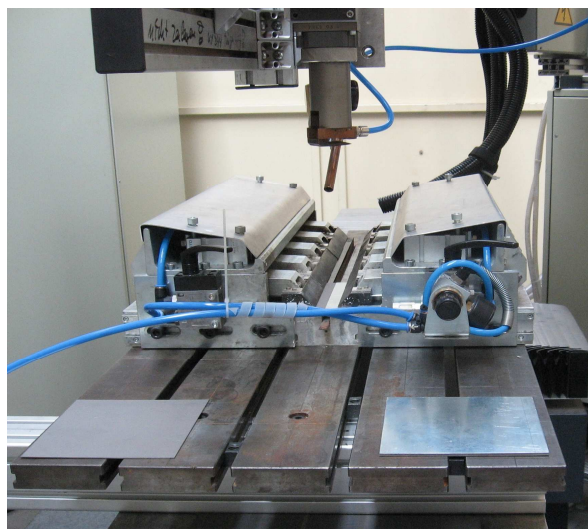


Abb. 41: Versuchsvorbereitung des Laserschweißprozesses

### 14.2.2 Prozessparameter des Laserschweißprozesses

Für den Schweißversuch wurden Parametersätze ermittelt, die ein optimales Schweißergebnis unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Werkstoffe und Bleckdicken erwarten ließen. Die eingestellten Parameter wurden während des Versuchsablaufes konstant gehalten. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit im Schweißversuch betrug  $v_f = 8 \text{ m/min}$  bei einer Laserleistung von  $P_L 4 \text{ kW}$ . Als Schweißschutzgas zum Schutz vor Reaktionen mit der Luft (Oxidation) wurde Argon zugeführt.



Abb. 42: Verbindung nach erfolgtem Laserschweißversuch



### 14.2.3 Technische Daten der CHF-Schweißanlage

Nennarbeitsfrequenz	360 kHz $\pm$ 20%
Nennleistung bei 100% ED	85 kW
Anschlussleistung	$\approx$ 160 kVA
Betriebsspannung	400 V / 50 Hz
Stauchkraft	max. 60 kn
Steuerspannung	24 V

Tab. 10: Technische Daten der CHF-Schweißanlage



Abb. 43: Hochfrequenzschweißanlage zum konduktiven Schweißen (KUKA)

#### 14.2.3.1 Prozessparameter des CHF-Schweißprozesses

Generatorleistung	70% von 85 kW
-------------------	---------------

Mit Hilfe der Generatorleistung wird die an den Stoßkanten durch Widerstandserwärmung hervorgerufene Temperatur in der Fügezone bestimmt. Die Generatorleistung wird in Prozent zum Maximalwert vorgewählt. Für die Versuchsschweißungen betrug der Einstellungs-wert 70% der maximal verfügbaren Leistung des Generators von 85 kW.

Stromzeit	0,53s
-----------	-------

Die eingebrachte Wärmemenge wird durch die Stromzeit in Verbindung mit der definierten Generatorleistung bestimmt. Um die Nahtüberhöhung der Probewerkstücke gering und konstant zu halten, wurde eine Stromzeit von 0,53s zu einer Generatorleistung von 70% gewählt.

<b>Ausspannlänge Werkstoff DC05</b>	4mm
<b>Ausspannlänge Werkstoff DP600</b>	6mm

Die Ausspannlänge der Platinen wurde für jede Probe so gewählt, dass der sich in Abhängigkeit von der Stauchkraft ergebende Stauchweg sicher erreicht und ein Bandkantenversatz vermieden wird. Für den Werkstoff DC05 wurde im Versuch eine Ausspannlänge von 4mm und für den Werkstoff DP600 eine Ausspannlänge von 6mm eingestellt.

<b>Spaltbreite</b>	2mm
--------------------	-----

Die Probewerkstücke wurden in den Spannwerkzeugen so positioniert, dass sich eine gleichmäßige Spaltbreite von 2mm ergab. Die exakte Einstellung der Spaltbreite ist wichtig für die Gewährleistung eines gleichmäßigen Stauchvorganges mit gleichmäßiger Nahtausprägung.

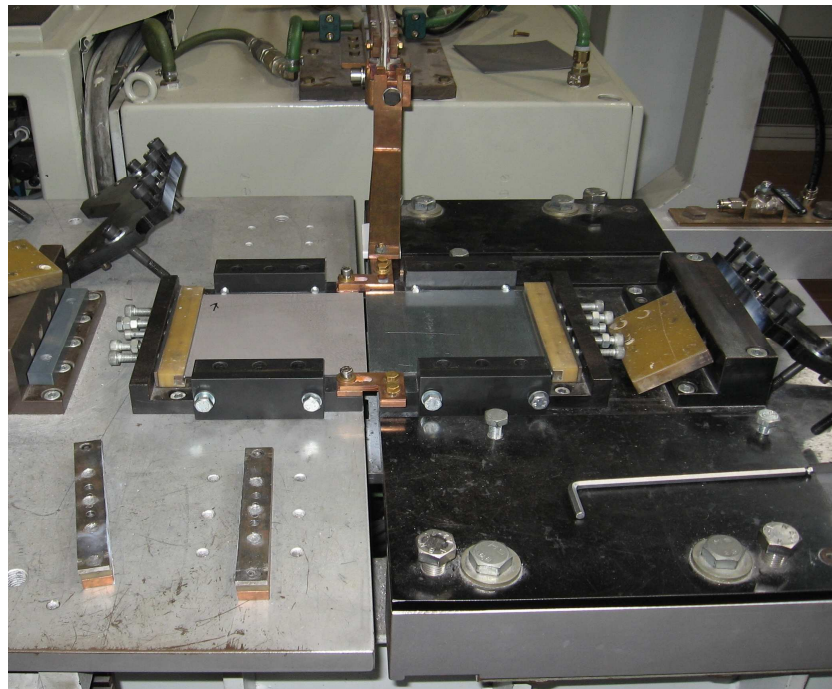


Abb. 44: Positionierung der Versuchswerkstücke in der CHFV-Anlage

<b>Stauchdruck</b>	40bar
--------------------	-------

Die Aufstauchung der zu fügenden Platinen im Versuch erfolgte frei ohne Begrenzung durch einen Anschlag. Um die notwendige Verbindung zu erzielen und gleichzeitig eine übermäßige Wulstausbildung zu vermeiden, wurde für die Versuchsschweißung ein Stauchdruck von 40bar eingestellt.

<b>spezifische Stauchkraft</b>	56,1 N/mm <sup>2</sup>
--------------------------------	------------------------

Die spezifische Stauchkraft an den zu verschweißenden Platinen errechnet sich wie folgt:

Der Durchmesser des Hydraulikzylinders beträgt 50 mm. Mit folgender Gleichung (2)

$$A = \pi \times r^2$$

errechnet sich eine Zylinderfläche von 1.963,5 mm<sup>2</sup>.

Bei einem Stauchdruck von 40bar (4 N/mm<sup>2</sup>) errechnet sich mit folgender Gleichung (3)

$$F = p \times A$$

die an den zu verschweißenden Platinen auftretende spezifische Stauchkraft. Die an den Fügekanten auftretende Kraft errechnet sich zu 56,1 N/mm<sup>2</sup> mit folgender Gleichung (4)

$$P = \frac{F}{A}$$

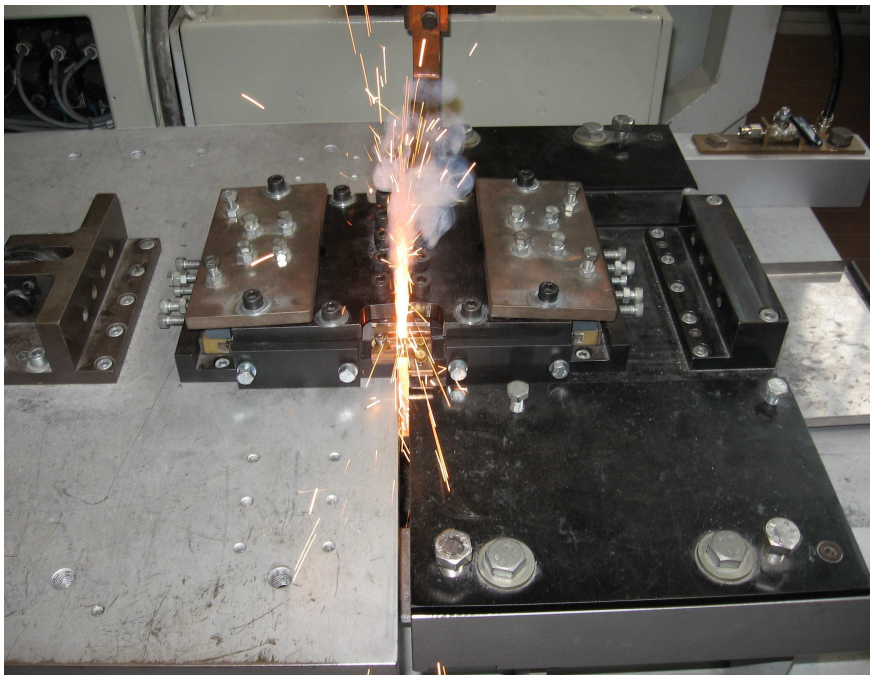
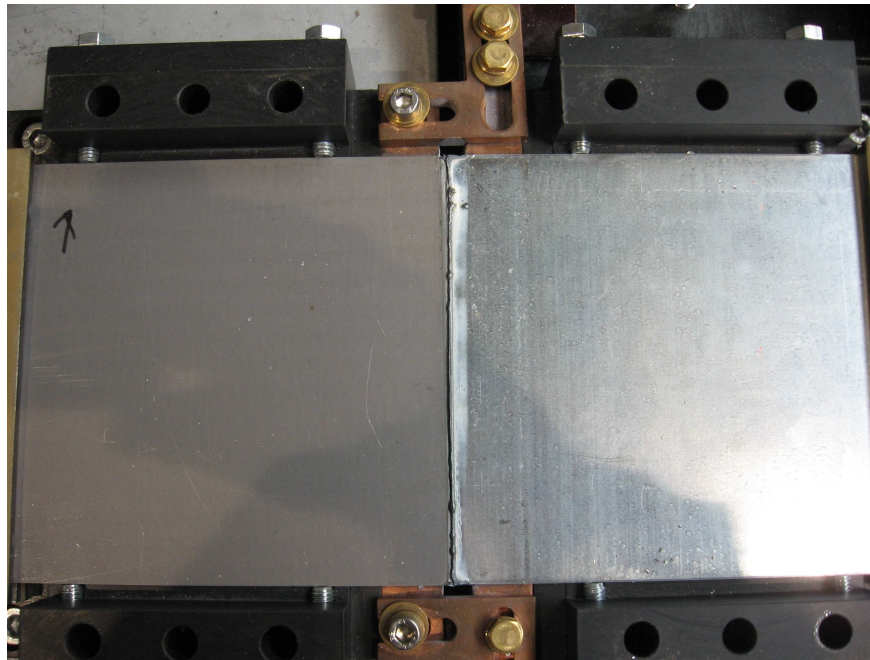


Abb. 45: CHF-Schweißprozess

<b>Stauchverkürzung</b>	1,45mm
-------------------------	--------

Im Schweißversuch hat sich unter den oben beschriebenen Einstellungswerten eine Stauchverkürzung in der Fügezone der Probewerkstücke von 1,45mm ergeben.



*Abb. 46: CHF-Verbindung nach erfolgtem Schweißversuch*

### **14.3 Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften**

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die wesentlichen Unterschiede und die sich daraus ergebenden Vor- bzw. Nachteile des Hochfrequenzschweißens gegenüber dem Laserstrahlschweißens aufzuzeigen, um die Eignung des CHF-Schweißens für das Fügen höherfester Stahlfeinbleche, die einer anschließenden Umformung unterzogen werden, zu ermitteln. Eine Umformung stellt hohe Anforderungen an die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißnaht. Die Bewertung der Schweißnahteigenschaften erfolgt daher zum einen durch metallografische Untersuchungen hinsichtlich des entstandenen Mikrogefüges und dessen Härte. Zum anderen werden statische Festigkeitsuntersuchungen mit Hilfe des einachsigen Querkzugversuchs sowie dem Erichsen-Versuch durchgeführt.

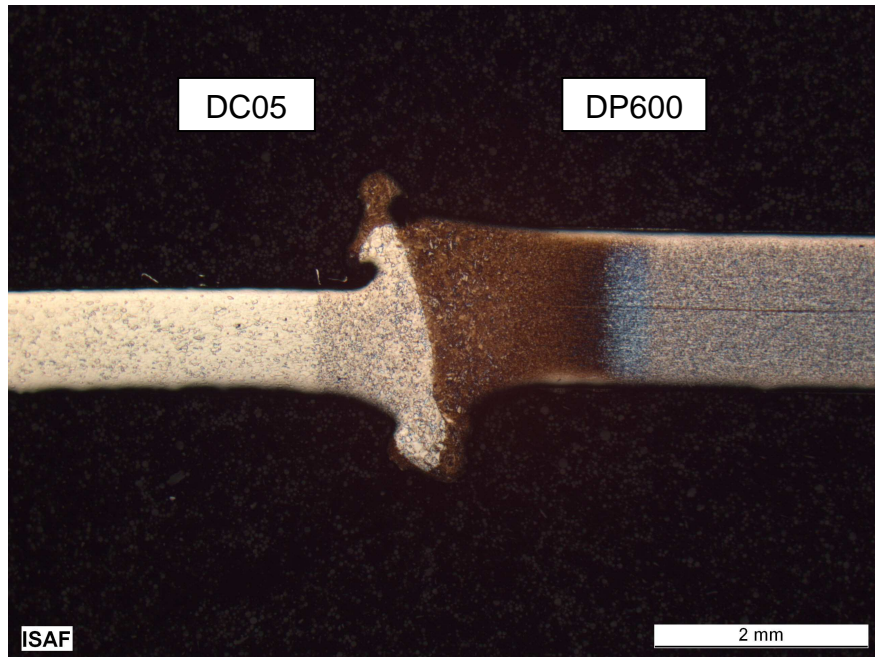
#### **14.3.1 Metallografische Untersuchungen**

Zur Bewertung des Mikrogefüges erfolgt die visuelle Charakterisierung der Schweißnahteigenschaften in zwei Schritten. Hierfür werden zunächst Querschliffe angefertigt, die anschließend für makroskopische Aufnahmen mittels Lichtmikroskop durch Schleifen und Ätzen präpariert werden. Diese Aufnahmen zeigen einen Querschnitt der gesamten Schweißnaht sowie eines Teils des Grundwerkstoffs und geben Aufschluss über die Qualität der Naht im Hinblick auf Nahteinfall oder -überhöhung, die Homogenität der Anbindung und die Nahtbreite. Anschließend erfolgt die Anfertigung von Mikroschliffen, die einer Analyse des nach dem Schweißprozess vorliegenden Gefüges dienen. Hierfür kommt ein Lichtmikroskop zum



Einsatz. Die Aufnahmen zeigen die einzelnen Zonen sowie die Übergänge in den Bereichen der Wärmeeinflusszone (WEZ) und der Schweißnaht.

Wie in Abb. 47 zu sehen, weist die Naht die für das CHF-Schweißen typischen Stauchwulste an der Nahtober- und -unterseite auf. Darüber hinaus ist eine klare Trennung der beiden Werkstoffe im Bereich der Schweißnaht zu erkennen. Dies ist auf die beim HF-Schweißen vorliegende Temperatur zurückzuführen, die unterhalb der Liquidustemperatur liegt und so eine Durchmischung der Werkstoffe verhindert.



*Abb. 47: Übersicht einer CHF-geschweißten Naht*

Besonders deutlich wird dieser Effekt in der lichtmikroskopischen Aufnahme (Abb. 48). Auf der linken Seite ist der grobkörnige Ferrit des DC05 zu erkennen, der durch die in der Nähe der Fügelinie auftretenden, relativ hohen Austenitisierungstemperaturen entsteht.

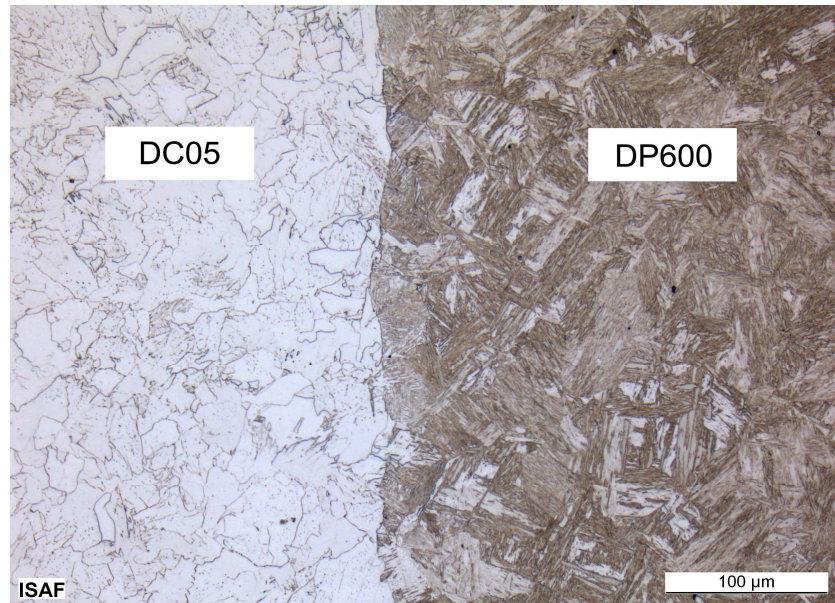


Abb. 48: Fügelinie in der Mitte der CHF-geschweißten Naht

Die in Abb. 49 dargestellte Laserschweißnaht zeigt die für dieses Verfahren typische Nahtausprägung mit einer leichten Innenwölbung an der Nahtunterseite, die auf die Schmelzbaddynamik zurückzuführen ist. Weiterhin ist eine klare Trennung zwischen den unterschiedlichen Werkstoffen zu erkennen. Durch die beim Laserstrahlschweißen entstehenden hohen Temperaturen wird das Material aufgeschmolzen und miteinander vermischt.

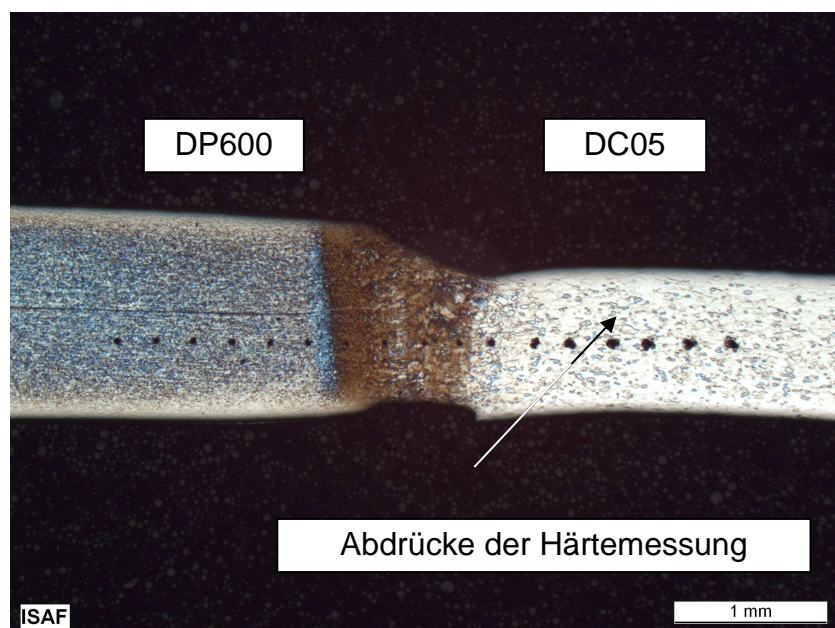
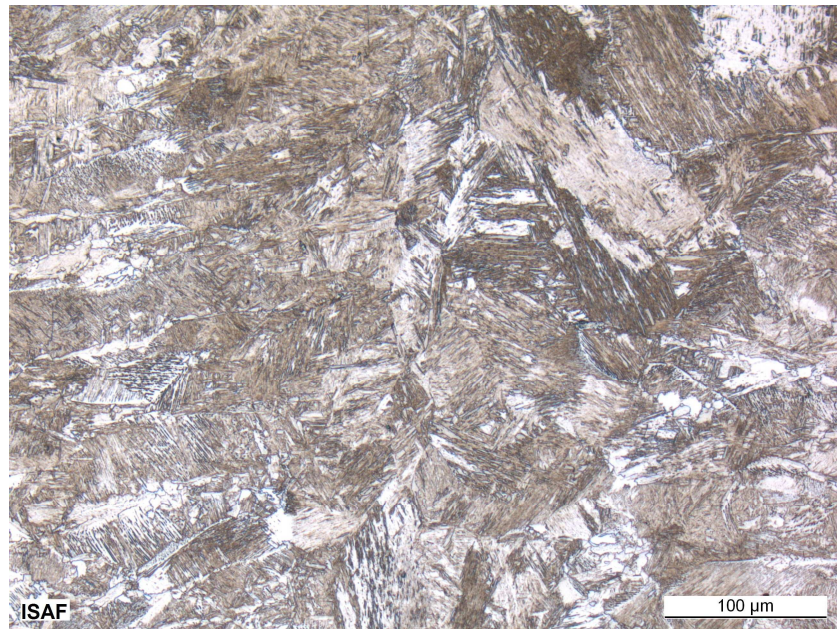


Abb. 49: Übersicht einer laserstrahlgeschweißten Naht



In der lichtmikroskopischen Aufnahme der Schweißnahtmitte (Abb. 50) ist dies ebenfalls zu erkennen. Die abgebildete Grobkornzone, bestehend aus grobem Martensit mit vorhandenen Ferriteinschlüssen, lässt auch hier Rückschlüsse auf die bei dem Prozess entstehenden, extrem hohen Austenitisierungstemperaturen zu.



*Abb. 50: Schweißnahtmitte bei einer lasergeschweißten Probe*

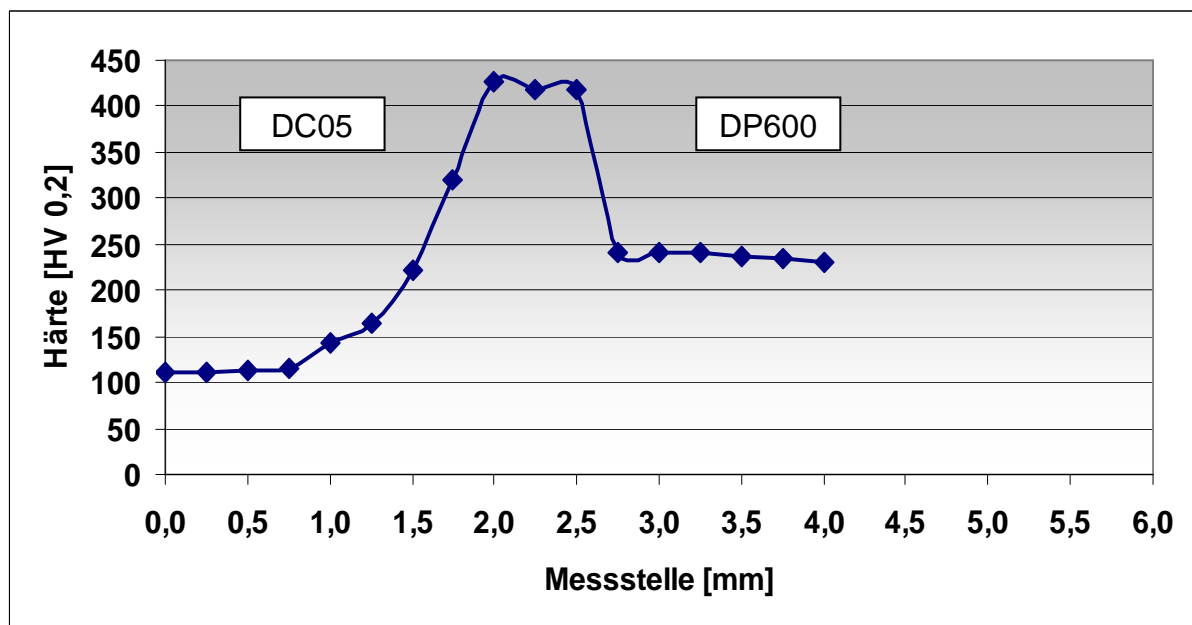
### 14.3.2 Härtemessungen

Die Ermittlung der Gefügehärte erfolgt mittels Kleinlasthärteprüfung nach Vickers gemäß DIN EN 6507, mit einer Prüfkraft von  $F = 1,96 \text{ N}$  bei einer Eindringzeit von 15 sek.. Der Abstand zwischen den Messpunkten beträgt 0,25 mm. Die Messungen beginnen im Grundwerkstoff des ersten Fügepartners und werden über die Schweißnaht bis in den Grundwerkstoff des zweiten Fügepartners fortgeführt. Anhand der Härtemessungen kann eine erste Aussage über die Duktilität der Schweißnaht und der angrenzenden Wärmeeinflusszone getroffen werden, da eine hohe Gefügehärte nachweislich mit einer geringeren Bruchdehnung des Werkstoffs einhergeht [28].

Die Vickers-Prüfung hat den Vorteil, dass mittels des hierbei verwendeten Eindringkörpers aus Diamant in Form einer geraden Pyramide mit quadratischer Grundfläche sowohl weiche als auch harte Werkstoffe geprüft werden können. Der kleine Pyramideneindruck beschädigt die Probe geringfügiger als ein z. B. ein Kugeleindruck. In einem Winkel von  $136^\circ$  zwischen gegenüberliegenden Flächen wird der Diamantkörper in die Oberfläche des Prüfstückes eingedrückt und aus der mittels eines Messmikroskops festgestellten Länge der Diagonalen des bleibenden Eindrucks die Eindruckoberfläche errechnet.

Die folgende Abb. 51 zeigt exemplarisch den Härteverlauf durch eine lasergeschweißte Verbindung. Unterhalb der Messreihe sind Mikroschliffe aus den Bereichen Grundwerkstoff, Wärmeeinflusszone und Fügezone aufgeführt, welche den Zusammenhang zwischen Mikro-  
härte und Mikrogefüge verdeutlichen.

Die Messreihe beginnt im Grundwerkstoff des DC05, welcher eine feinkörnige, ferritische Grundstruktur aufweist (Abb. 51 a). Aufgrund des Ferrits liegt die Grundwerkstoffhärte des DC05 bei ca. 116 HV<sub>0,2</sub>. Der Übergang zwischen Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszone ist deutlich an der Grobkornzone zu erkennen, die sich in den Bereichen höherer Temperaturen, also der WEZ, gebildet hat und die zu einem Anstieg der Härte führt. In Abb. 51 c ist schließlich das martensitische Gefüge mit vorhandenen Ferriteinschlüssen zu erkennen, welches in der Fügezone vorliegt. Die hohe Härte von bis zu 426 HV<sub>0,2</sub> ist hier auf den grobkörnigen Martensit zurückzuführen. Der DP600 mit einer Grundwerkstoffhärte von ca. 210 HV<sub>0,2</sub> bildet im Bereich der WEZ ein feinkörniges, martensitisches Gefüge, welches in den Grundwerkstoff übergeht (Abb. 51 d). Der Grundwerkstoff selbst besteht aus einer ferritischen Grundstruktur mit Anteilen von Martensit (Abb. 51 e).

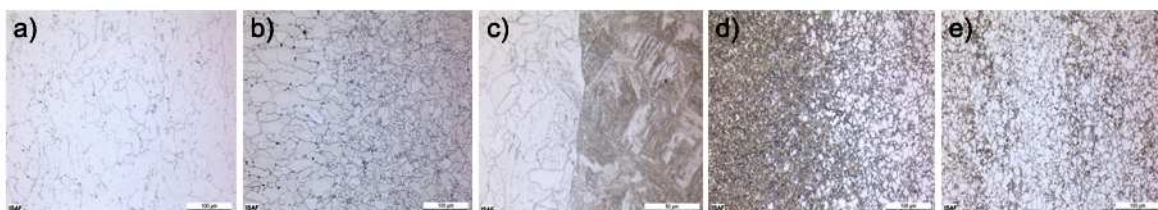
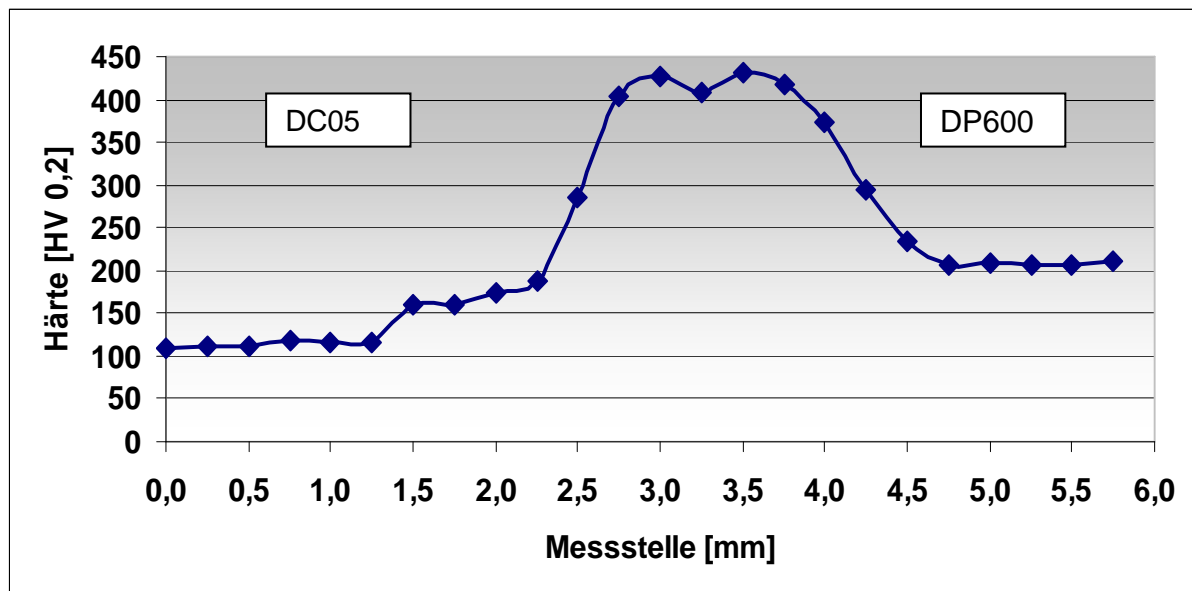


- a) DC05 Grundwerkstoff
- b) Übergang vom Grundwerkstoff in die WEZ
- c) Fügezone
- d) Übergang von der WEZ in den Grundwerkstoff
- e) DP600 Grundwerkstoff

Abb. 51: Härteverlauf in einer lasergeschweißten Probe



Die in der Abb. 52 dargestellte Messreihe zeigt den Härteverlauf in einer CHF-geschweißten Verbindung. Sowohl der Härteverlauf als auch das Mikrogefüge in den Bereichen der WEZ und der Fügezone unterscheiden sich deutlich von denen in der laserstrahlgeschweißten Probe. Hier ist die WEZ wesentlich breiter, was auf die verfahrensbedingte Temperaturverteilung zurückzuführen ist. Dadurch entsteht ein insgesamt homogenerer Härteverlauf, der keine so großen Sprünge aufweist, wie sie in Abb. 51 zu sehen sind. Erkennbar wird dies auch an den Übergängen vom Grundwerkstoff in die WEZ (Abb. 52 b, d). Beim CHF-Schweißen sind diese Bereiche wesentlich breiter und nicht so klar voneinander abgegrenzt, wie beim Laserstrahlschweißen (Abb. 52 b, d). Im Hinblick auf das Umformvermögen ist dies von Vorteil, da extreme Härteunterschiede als metallurgische Kerbe wirken und so die mechanische Belastbarkeit der Verbindung negativ beeinträchtigen können. Ein weiterer wesentlicher Unterschied liegt in der durch die geringen Prozesstemperaturen bedingten, fehlenden Durchmischung der Werkstoffe in der Fügezone.



- a) DC05 Grundwerkstoff
- b) Übergang vom Grundwerkstoff in die WEZ
- c) Fügezone mit Fügelinie
- d) Übergang von der WEZ in den Grundwerkstoff
- e) DP600 Grundwerkstoff

Abb. 52: Härteverlauf in einer CHF-geschweißten Probe

### 14.3.3 Statische Festigkeitsuntersuchungen

Um eine Aussage über das Versagensverhalten sowie die Duktilität der Schweißnaht anhand mechanischer Kennwerte treffen zu können, wird sowohl der Erichsenversuch nach DIN 50 101 als auch der Querkugversuch nach DIN EN 10002-1 herangezogen. Hierbei handelt es sich um zerstörende Prüfverfahren, bei denen die Proben bis zu einem Riss beziehungsweise Bruch belastet werden.

#### 14.3.3.1 Ergebnisse aus dem Erichsen-Versuch

Neben der Auswertung der Messdaten wird beim Erichsen-Versuch auch eine visuelle Bewertung der Verbindungseigenschaften vorgenommen. Wie in Abb. 53 a1 und a2) beispielhaft an den lasergeschweißten Proben dargestellt, tritt das Versagen ausschließlich im Grundwerkstoff des dünneren DC05 auf. Bei zwei Dritteln der CHF-geschweißten Proben zeigt sich das gleiche Verhalten (Abb. 53 b2). Ein Drittel der Tiefungen weist dagegen einen Riss quer zur Schweißnaht auf, der sich bis in den Werkstoff des DP600 fortsetzt (Abb. 53 b1). Die Ursache hierfür liegt begründet in den sehr unregelmäßig ausgeprägten Stauchwulsten. Diese bilden geometrische Kerben, welche senkrecht zur Schweißnaht verlaufen. Anders als beim einachsigen Querkugversuch wird mit dem Erichsen-Versuch ein zweiachsiger Spannungszustand in der Schweißnaht erzeugt. Die zusätzliche Belastung in Längsrichtung der Schweißnaht führt zu einer Spannungsüberhöhung an den Kerbspitzen und somit zum Reißen des Werkstoffs.

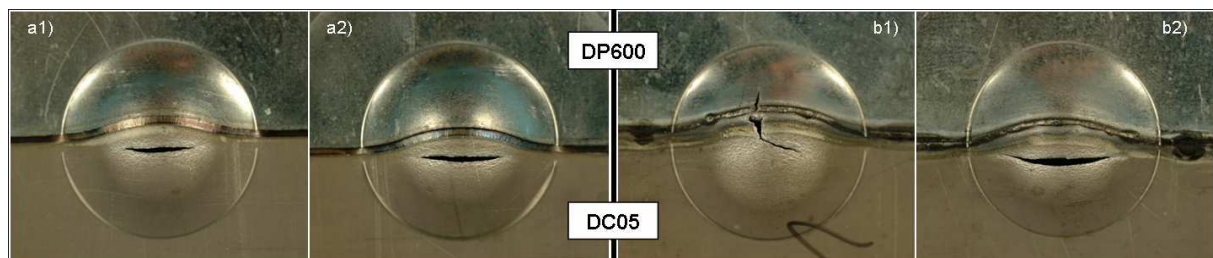


Abb. 53      a1) und a2): Versagensverhalten einer lasergeschweißten Probe  
              b1) und b2): Versagensverhalten einer CHF-geschweißten Probe

Um die Tiefungskennwerte der mit Laserschweißverfahren und dem induktiven Hochfrequenzschweißverfahren geschweißten Proben zu vergleichen, wird jeweils der Mittelwert aus den gemessenen Maxima ermittelt. Für die Laser-Proben ergibt sich ein durchschnittlicher Wert von ca. 8,5 mm und für die CHF-Proben von ca. 8,1 mm. Es ist also festzustellen, dass kein signifikanter, verfahrensbedingter Unterschied im Verformungsvermögen der untersuchten Proben existiert.

### 14.3.3.2 Ergebnisse aus dem Querkzugversuch

Der einachsige Zugversuch dient der Ermittlung von Festigkeits- und Verformungskennwerten eines Werkstoffs oder einer Verbindung [2]. Im Hinblick auf die Duktilität der Schweißnaht steht hier die Bruchdehnung als Verformungskennwert im Vordergrund. In Abb. 54 ist die für diesen Versuch verwendete Probengeometrie abgebildet. Das Fräsen der Kanten ist notwendig, um eine Beeinflussung des Ergebnisses durch Kerbwirkung an den Kanten der Probe zu vermeiden. Diese wird durch Kerben verursacht, die beim Ausschneiden der Proben mit dem CO<sub>2</sub>-Laser entstehen. Die so präparierte Probe wird anschließend mit einer Zugrate von 10 mm/min quer zur Schweißnaht auseinander gezogen.

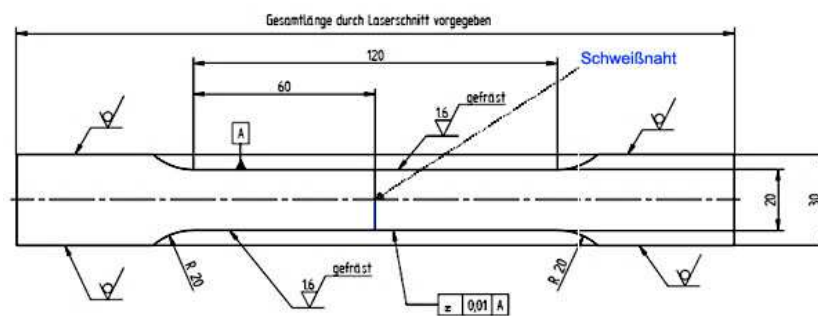


Abb. 54: Probengeometrie für Querkzugversuche

Bei den Zugversuchen ist erwartungsgemäß kein Unterschied zwischen den Proben, die mit dem jeweiligen Fügeverfahren hergestellt wurden, zu ermitteln. Sämtliche Proben versagten im Grundwerkstoff des DC05, welcher eine geringere Dicke und Streckgrenze als der DP600 aufweist (Abb. 55). Aus diesem Grund zeigt auch der Verlauf der Spannungs-Dehnungskurve der hier exemplarisch aufgeführten Proben keine signifikanten Abweichungen.

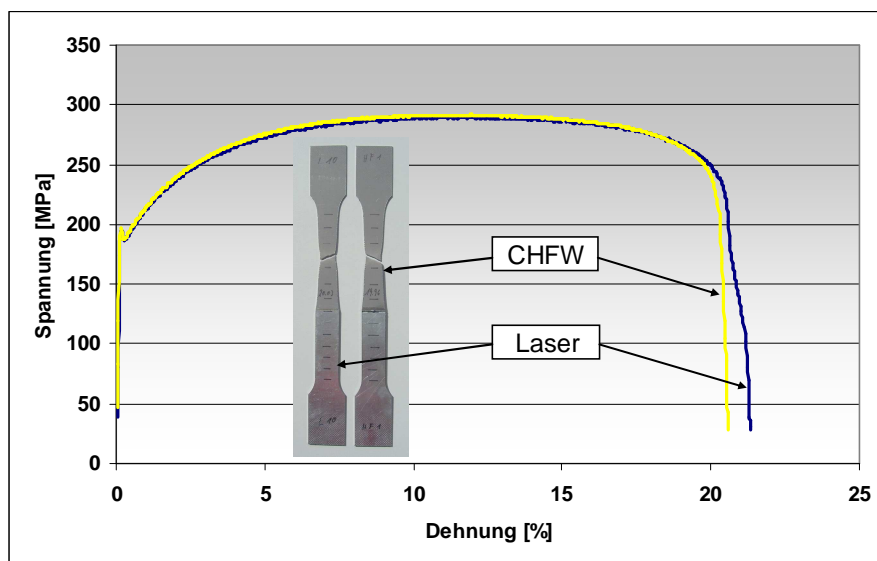


Abb. 55: Spannungs-Dehnungsverläufe einer laserstrahlgeschweißten Probe (blau) und einer CHF-geschweißten Probe (gelb)

## 14.4 Fazit aus den vergleichenden Untersuchungen

Das Laserschweißen hat sich bei der Fertigung von Tailored Blanks trotz hoher Investitionskosten aufgrund seiner technologischen Vorteile gegenüber anderen Fügeverfahren durchgesetzt. Bisher konnten vergleichbare Verbindungseigenschaften mit keinem alternativen Fügeverfahren wirtschaftlich erzeugt werden. Hervorzuheben sind die erzielbaren, sehr guten Schweißnahtqualitäten, die eine Nacharbeit der Naht meist überflüssig machen und somit den hohen optischen Anforderungen an Bauteile, die im Außenhautbereich einer Karosserie eingesetzt werden, gerecht werden. Bei der Durchführung der Schweißversuche und in den vergleichenden Untersuchungen ging es insbesondere darum, die Eignung und Einsatzmöglichkeiten des CHF-Schweißprozesses als alternatives Schweißverfahren zu prüfen. Aus der Rohrherstellung ist das Hochfrequenzschweißen seit vielen Jahren bekannt und etabliert. Die Ergebnisse aus dem Vergleich des Laserstrahlschweißverfahrens und des CHFW-Verfahrens sind im vorangegangenen Kapitel vorgestellt worden, verdeutlichen die wesentlichen Unterschiede und zeigen insbesondere, dass sich das Hochfrequenzschweißen mit konduktiver Energieübertragung in besonderer Weise für die Herstellung von Tailored Blanks eignet. Es zeichnet sich durch kurze Prozesszeiten, Minimierung des Verzuges durch geringe Wärmeeinbringung und die Erzielung hochwertiger Verbindungen aus.

In Abb. 56 a) und b) sind die im Versuch erzielten Schweißverbindungen beider Verfahren gegenübergestellt:

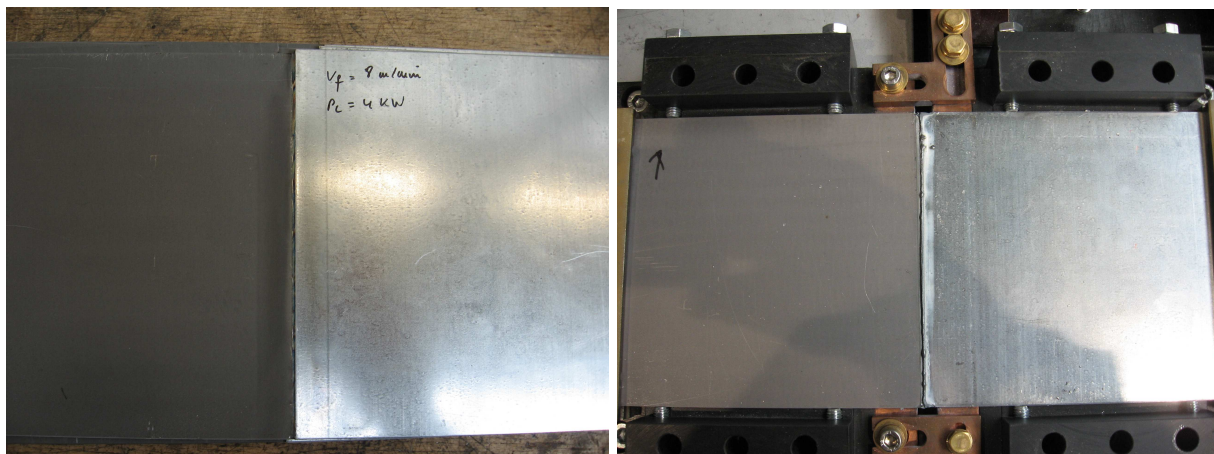


Abb. 56 a): Laserschweißnaht

b) CHF-Schweißnaht

Bei beiden Verfahren ist die Möglichkeit einer prozessintegrierten Wärmebehandlung beim Schweißen gegeben, die das Verarbeiten hochfester und höchstfester Stahlwerkstoffe erlaubt. Dies ist insbesondere beim Laserschweißprozess wichtig, da durch die konzentrierte Wärmeeinbringung mit Verzug und Heißrissen durch die hohen Härtegradienten zu rechnen ist.

Mit einer Schweißzeit von ca. einer Sekunde pro Meter Schweißnaht erlaubt das Hf-Schweißen deutlich höhere Schweißgeschwindigkeiten als das Laserstrahlschweißen. Allerdings kann die verfahrensbedingte Bildung eines Stauchwulstes auf der Nahtober- und Unterseite in bestimmten Fällen zu einer Schwächung der Verbindung durch Bildung von geometrischen Kerben führen, falls dieser in einem nachfolgenden Arbeitsschritt entfernt wird. Dadurch erhöht sich das Risiko des Versagens der Schweißnaht im Umformprozess. Generell erfolgt das Entfernen der Stauchwulst durch Schaben, da ein alternatives Verfahren wie z. B. Fräsen den Gesamtprozess sehr aufwendig gestalten würde und zudem die Gefahr birgt, die Zinkschicht des Werkstücks zu beschädigen.

Da ohne Nachbearbeitung der Schweißnaht im Hf-Prozess aus optischen Gründen kein Einsatz der Bauteile im sichtbaren Bereich (Karosseriebau) möglich ist, entscheidet der individuelle Anwendungsfall über den Einsatz dieses Verfahrens. Das induktive Hochfrequenzschweißen für die Herstellung von Platinen stellt durch die hohe Schweißgeschwindigkeit und die im Vergleich zu Laseranlagen niedrigen Investitionskosten bei den Anlagenkomponenten eine interessante, jedoch derzeit noch wenig beachtete und praktizierte Alternative dar. Die Tatsache, dass ein Abarbeiten des Stauchwulstes nicht in jedem Fall erforderlich ist, da viele Bauteile im nicht sichtbaren Bereich des Fahrzeugbaus eingesetzt werden (Unterboden, Tunnel, Radkasten etc.) und insbesondere im LKW-Bau sowie im Bereich Nutzmachines häufig Einsatzmöglichkeiten für Bauteile gegeben sind, die keine optisch einwandfreien Schweißnähte erfordern, eröffnet dem CHF-Schweißverfahren vielfältige Anwendungsmöglichkeiten.

## 15 Vergleichsberechnungen (Laserschweißanlagen/CHF-Schweißanlage)

Die nachfolgenden Berechnungen beruhen auf den Investitionskosten von Schweißanlagen, die derzeit im industriellen Bereich für die Herstellung von Tailored Blanks eingesetzt werden. Der Vergleich bezieht sich auf folgende vier Schweißanlagen:

Laserschweißanlage	Laserschweißanlage	Laserschweißanlage	CHF-Schweißanlage
Yb:YAG-Festkörperlaser	Nd:YAG-Festkörperlaser	CO <sub>2</sub> -Slab-Laser Gaslaser	Hochfrequenz-Generator
Scheibenlaser, 4 kW	Stablaser, 4 kW	6 kW	100kW/400kHz

Grundlage der Berechnungen sind ausschließlich die Anschaffungs- und Betriebskosten der zum Vergleich stehenden Anlagen. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Komponenten der einzelnen Anlagen und stark bauteilabhängigen Werkzeuge und Zuführungselemente für Platinen werden ausschließlich die fiktiven Kosten des reinen Schweißprozesses betrachtet. Die ermittelten Kosten beruhen überwiegend auf Betreiber- oder Herstellerangaben der beschriebenen Anlagen und basieren teilweise auf eigenen Schätzungen und Annahmen. Die Berechnung der jeweiligen Maschinenstundensätze erfolgt unter Berücksichtigung der Investitionskosten sowie der festen und der variablen Prozesskosten pro Stunde. Als kalkulatorische Zinsen werden 7% p. a., eine Betriebsdauer von 6.000 Stunden pro Jahr und eine Gesamtbetriebsdauer von 42.000 Stunden angenommen. Die Abschreibung der Investitionskosten erfolgt auf den Wiederbeschaffungswert. Danach ergeben sich für die zum Vergleich stehenden Schweißanlagen folgende Werte:

Yb:YAG Festkörperlaser (Scheibenlaser) 4kW		
Investitionskosten	€	Rahmenbedingungen/Kommentar
Laserpreis	490.000,00	inkl. Pumpmodul, Kühler, Strahlführung, Installation apparative und bauliche Vorkehrungen
Sicherheitsaufwand	200.000,00	
<b>Gesamtkosten Anlage</b>	<b>690.000,00</b>	Inflationsrate: 4% jährl. Abschreibungszeitraum: 7 Jahre 7% linear auf 50% der Investitionskosten
Wiederbeschaffungswert	(907.000,00)	
Abschreibungswert	129.713,00	
Zinskosten	24.150,00	
Summe:	153.863,00	Annahme: 6.000 Betriebsstunden jährlich € 0,07/kWh (Intervall: 50% Betrieb/50% Standby) € 0,07/kWh (Intervall: 50% Betrieb/50% Standby) Dioden 2% der Investitionskosten, verteilt auf 42.000 Stunden
<b>Feste Kosten/h</b>	<b>25,64</b>	
Energiekosten Laser	1,37	
Energiekosten Kühler	0,76	
Verbrauchskosten	9,92	
Wartungskosten	1,63	
<b>variable Kosten/h</b>	<b>13,68</b>	
<b>Gesamtkosten/h</b>	<b>39,32</b>	

Tab. 11: Kostenberechnung Yb:YAG Festkörperlaser

<b>Nd:YAG Festkörperlaser (Stablaser) 4kW</b>		
<b>Investitionskosten</b>	<b>€</b>	<b>Rahmenbedingungen/Kommentar</b>
Laserpreis	370.000,00	inkl. Pumpmodul, Kühler, Strahlführung, Installation apparative und bauliche Vorkehrungen
Sicherheitsaufwand	200.000,00	
<b>Gesamtkosten Anlage</b>	<b>570.000,00</b>	Inflationsrate: 4% jährl. Abschreibungszeitraum: 7 Jahre 7% linear auf 50% der Investitionskosten  Annahme: 6.000 Betriebsstunden € 0,07/kWh (Intervall: 50% Betrieb/50% Standby) € 0,07/kWh (Intervall: 50% Betrieb/50% Standby) Dioden 2% der Investitionskosten, verteilt auf 42.000 Stunden
Wiederbeschaffungswert	(750.081,00)	
Abschreibungswert	104.154,00	
Zinskosten	19.950,00	
Summe:	124.104,00	
<b>Feste Kosten/h</b>	<b>21,84</b>	
Energiekosten Laser	2,23	
Energiekosten Kühler	1,57	
Verbrauchskosten	13,20	
Wartungskosten	1,23	
<b>variable Kosten/h</b>	<b>18,23</b>	
<b>Gesamtkosten/h</b>	<b>40,07</b>	

Tab. 12: Kostenberechnung Yd:YAG Festkörperlaser

<b>CO<sub>2</sub>-Slab-Laser (Gaslaser) 6kW</b>		
<b>Investitionskosten</b>	<b>€</b>	<b>Rahmenbedingungen/Kommentar</b>
Laserpreis	400.000,00	inkl. Positionierlaser, Justiervorrichtung, Rampengenerator, Leistungssensor, Spiegeloptik, Druckindikator, Spülluftaufbereitung, ext. Kühler, Filter, Installation apparative und bauliche Vorkehrungen
Sicherheitsaufwand	200.000,00	
<b>Gesamtkosten Anlage</b>	<b>600.000,00</b>	Inflationsrate: 4% jährl. Abschreibungszeitraum: 7 Jahre 7% linear auf 50% der Investitionskosten  Annahme: 6.000 Betriebsstunden € 0,07/kWh (Intervall: 50% Betrieb/50% Standby) € 0,07/kWh (Intervall: 50% Betrieb/50% Standby)  2% der Investitionskosten, verteilt auf 42.000 Stunden
Wiederbeschaffungswert	(789.559,00)	
Abschreibungswert	112.794,00	
Zinskosten	21.000,00	
Summe:	133.794,00	
<b>Feste Kosten/h</b>	<b>22,30</b>	
Energiekosten Laser	3,14	
Energiekosten Kühler	1,81	
Verbrauchskosten:		
- Lasergas	0,15	
- Spülluftkosten	0,18	
- Ersatz-/Verschleißteile	1,35	
Wartungskosten	1,33	
<b>variable Kosten/h</b>	<b>7,96</b>	
<b>Gesamtkosten/h</b>	<b>30,26</b>	

Tab. 13: Kostenberechnung CO<sub>2</sub>-Slab-Laser



<b>Hochfrequenzschweißanlage (konduktives Schweißen) 100 kW/400kHz</b>		
<b>Investitionskosten</b>	<b>€</b>	<b>Rahmenbedingungen/Kommentar</b>
Schweißanlage	200.000,00	inkl. Generator, Stauchschlitten, Spannaufnahme/Elektroden, Installation
Sicherheitsaufwand	0,00	
<b>Gesamtkosten Anlage</b>	<b>200.000,00</b>	
Wiederbeschaffungswert	(263.186,00)	Inflationsrate: 4% jährl.
Abschreibungswert	37.598,00	Abschreibungszeitraum: 7 Jahre
Zinskosten	7.000,00	7% linear auf 50% der Investitionskosten
Summe:	44.598,00	
<b>Feste Kosten/h</b>	<b>7,43</b>	Annahme: 6.000 Betriebsstunden
Energiekosten	2,35	€ 0,07/kWh
Verschleißteile	2,67	Stromkontaktelemente
Wartungskosten	0,67	2% der Investitionskosten, verteilt auf 42.000 Stunden
<b>variable Kosten/h</b>	<b>5,69</b>	
<b>Gesamtkosten/h</b>	<b>13,12</b>	

Tab. 14: Kostenberechnung Hochfrequenzschweißanlage CHFW

Die festen jährlichen Kosten unter Berücksichtigung der Teuerungsrate beinhalten die Abschreibungskosten bezogen auf den Wiederbeschaffungswert und die Zinskosten. In nachfolgender Abbildung (Abb. 57) sind die festen Kosten der zum Vergleich stehenden vier Schweißanlagen in Relation grafisch dargestellt:

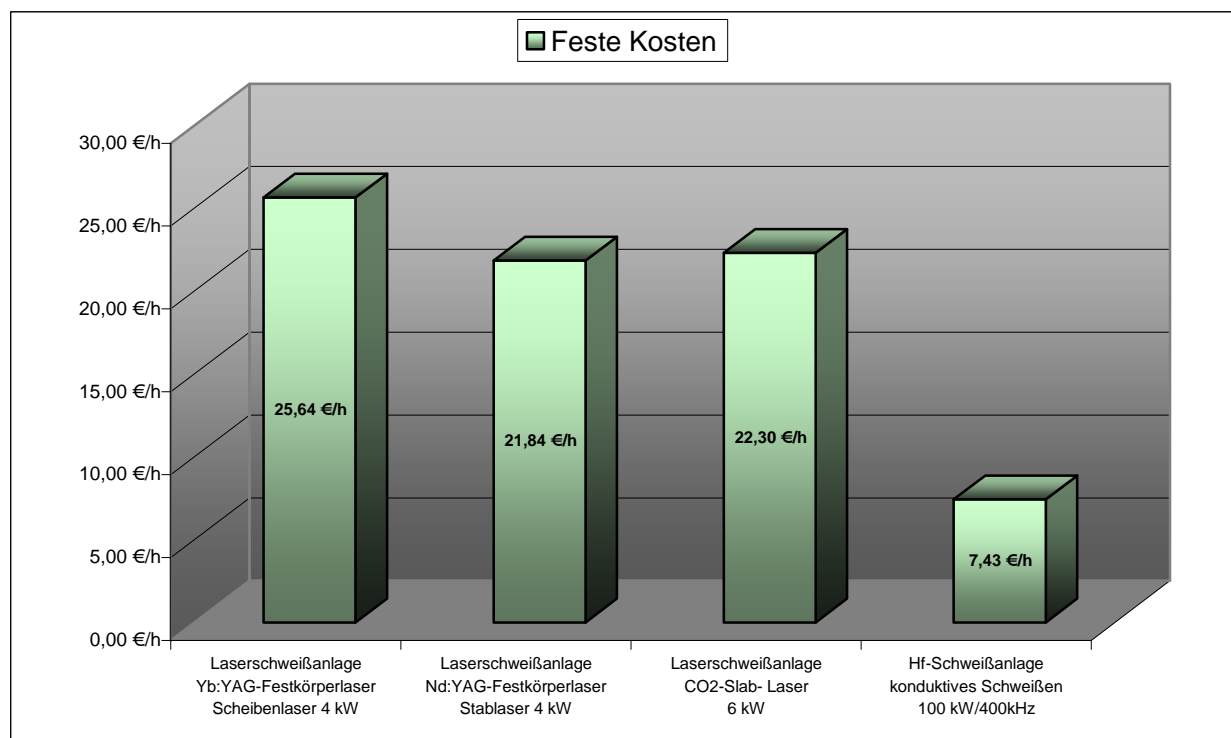


Abb. 57: Grafik feste Kosten der Schweißanlagen



Die variablen jährlichen Kosten beinhalten die Energiekosten, Verbrauchs- und Verschleißteile und Wartungskosten der Anlagen. Die Wartungskosten wurden mit 2% der Investitionskosten angenommen. Im Falle der Laseranlagen wird ein Betriebsintervall von 50% Strahl ein und 50% Strahl aus zugrunde gelegt. Bei der CHF-Anlage wird ein Standby-Betrieb von 80% angenommen. In der grafischen Darstellung (Abb. 58) ergibt sich danach folgende Relation:

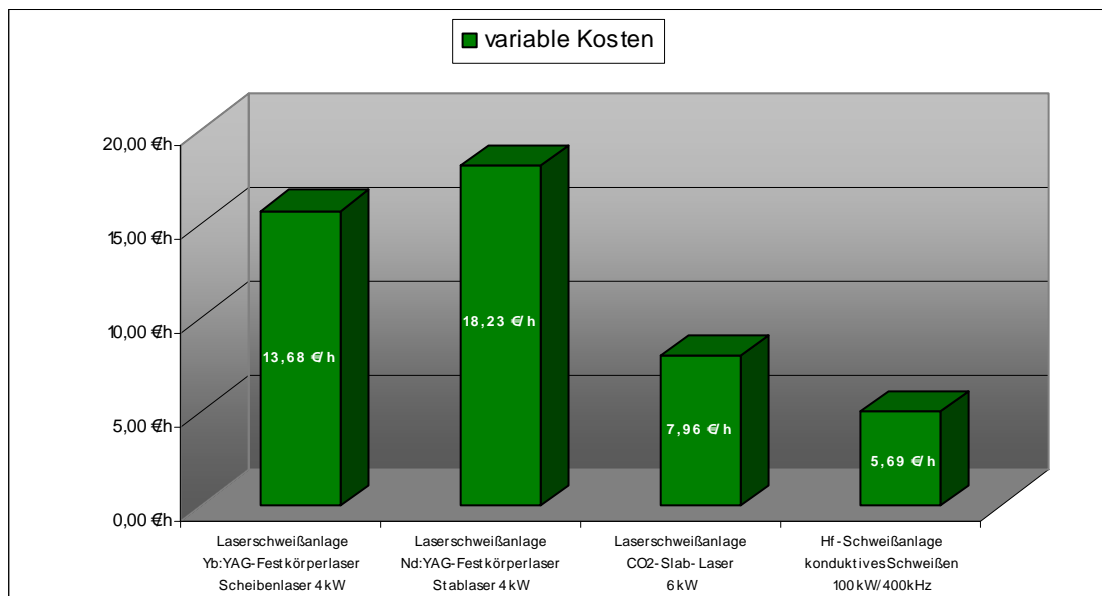


Abb. 58: Grafik variable Kosten der Schweißanlagen

Zur Berechnung des Maschinenstundensatzes werden die Investitionskosten unter Berücksichtigung der festen und variablen Kosten ermittelt. In nachfolgender Grafik (Abb. 59) sind die sich daraus ergebenden Werte zusammengefasst und in Relation zueinander gestellt:

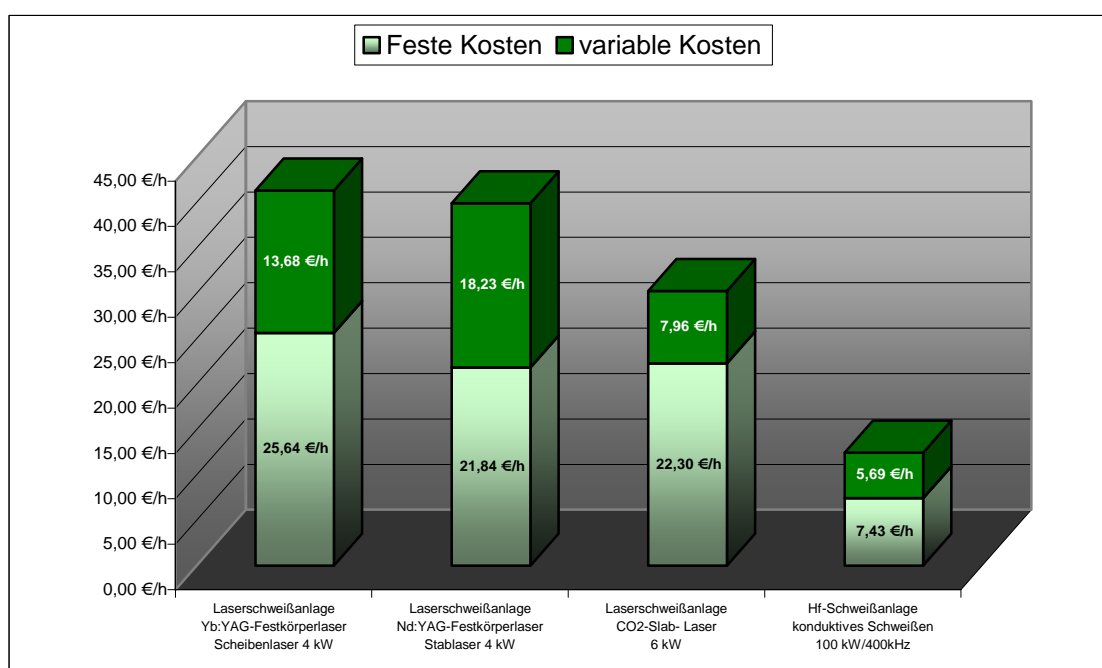


Abb. 59: Grafik feste und variable Kosten von Schweißanlagen

Das Ergebnis zeigt, dass die stündlichen Prozesskosten (Tab. 15) des CHF-Schweißverfahrens nur ca. ein Drittel der Kosten des Laserschweißprozesses betragen, wenn z. B. ein Scheibenlaser zum Einsatz kommt. Faktoren, die im Falle der Laseranlagen zu den hohen Investitionskosten beitragen, sind der erhebliche Aufwand für die erforderliche Sicherheitstechnik sowie bei diodengepumpten Systemen die Kosten für den Diodensatz, die in den vorliegenden Berechnungen mit ca. € 150.000,-- pro Einheit berücksichtigt werden. Im Falle der CHF-Anlage unterliegen die Spannwerkzeuge dem Verschleiß. Ein Austausch ist jeweils nach 1.500 Betriebsstunden vorgesehen und wird in dieser Kostenanalyse mit € 2.000,-- pro Stück berücksichtigt.

	Laserschweißanlage Yb:YAG- Festkörperlaser Scheibenlaser, 4 kW	Laserschweißanlage Nd:YAG- Festkörperlaser Stablaser, 4 kW	Laserschweißanlage CO <sub>2</sub> -Slab-Laser 6 kW	CHF-Schweißanlage Generator 100kW/400kHz
Investitionskosten	490.000,00 €	370.000,00 €	400.000,00 €	200.000,00 €
feste Kosten/h	25,64 €	21,84 €	22,30 €	7,43 €
variable Kosten/h	13,68 €	18,23 €	7,96 €	5,69 €
Kosten insgesamt/h	<b>39,32 €</b>	<b>40,07 €</b>	<b>30,26 €</b>	<b>13,12 €</b>

Tab. 15: Maschinenstundensätze der zum Vergleich stehenden Schweißanlagen

## 16 Wirtschaftliche Betrachtung

Das Tailored Blank-Schweißen ist ein hoch technisierter Vorgang, der wirtschaftlich immer mehr unter Druck gerät. Das bedeutet, eine solche Schweißanlage muss heutzutage höchsten Output bringen bei gleichzeitiger Gewährleistung absoluter Prozesssicherheit, um Personalkosten gering zu halten. Außerdem sollte beim Fügen eine gute Spaltüberbrückbarkeit erzielt werden können. Je größer die zu überbrückende Fuge sein darf, umso mehr kann bei der Qualität des Zuschnittes in der Vorarbeit eingespart werden. Selbstverständlich muss die Schweißnaht eine hohe dokumentierte Güte aufweisen. Die Erfüllung hoher Qualitätsanforderungen und Einhaltung enger Toleranzgrenzen bestimmen letztlich die Wettbewerbsfähigkeit am Markt. Die wichtigsten Anforderungen, die ein wirtschaftlich hergestelltes Bauteil erfüllen muss, liegen in der funktionsgerechten Gestaltung (Erfüllung der Gebrauchseigenschaften), Resistenz gegen Umwelteinflüsse sowie geringes Gewicht bei ausreichender Steifigkeit (Vermeidung von Überdimensionierungen). Kürzere Produktlebenszyklen, kürzere Durchlaufzeiten, sinkende Losgrößen, sinkende Lagerbestände und ein verringertes Netto-Umlaufvermögen sind die gegenwärtigen Trends, die sowohl Anlagenhersteller als auch Betreiber vor immer größere Herausforderungen stellen. Der frühzeitige Einsatz von Kosten reduzierenden Maßnahmen im Planung und Ausführung sind für den Bauteil-Hersteller von größter Bedeutung. Zu diesen Maßnahmen gehören neben dem Einsatz von Kostenberechnungs- und Bewertungsverfahren auch praktische Maßnahmen wie z. B. die Reduzierung der Produkthanforderungen auf die wesentlichen Betriebs- und Funktionsanforderungen, Minimierung der Typenvielfalt, größtmögliche Erweiterung der Toleranzfelder sowie die Vermeidung von Faktoren die den Herstellungsprozess behindern und verteuern. (Abb. 60).

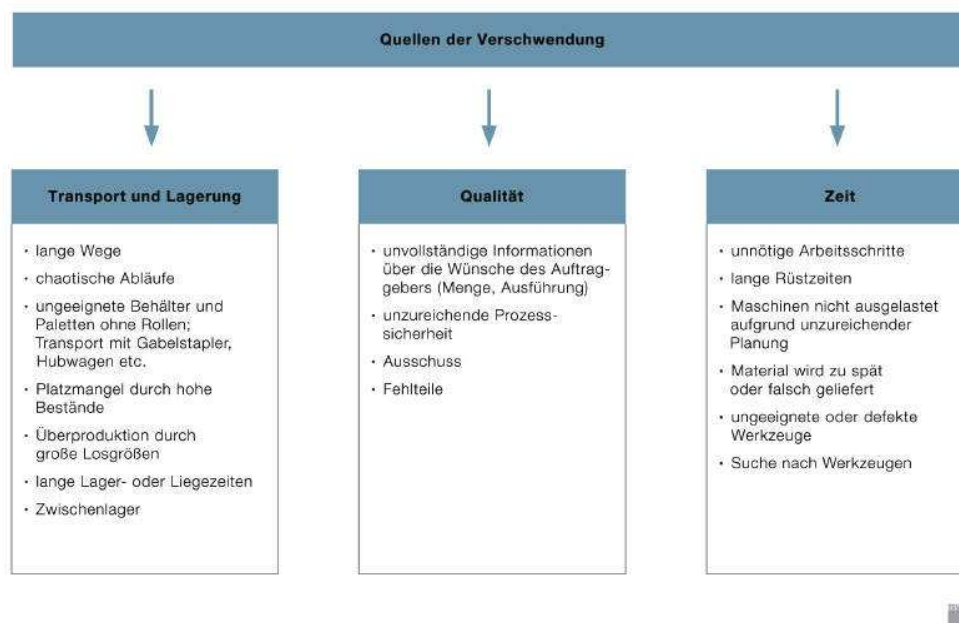


Abb. 60: Quellen der Verschwendung im Produktionszyklus [Trumpf]

Die wichtigsten Anforderungen, die ein wirtschaftlich hergestelltes Bauteil erfüllen muss, liegen in der funktionsgerechten Gestaltung (Erfüllung der Gebrauchseigenschaften), Resistenz gegen Umwelteinflüsse sowie geringes Gewicht bei ausreichender Steifigkeit (Vermeidung von Überdimensionierungen). Die Entwicklung der Änderungskosten eines Produkts im betrieblichen Durchlauf sowie der Einfluss der Produktionsbereiche auf die Herstellungskosten ist in Abb. 61 dargestellt:

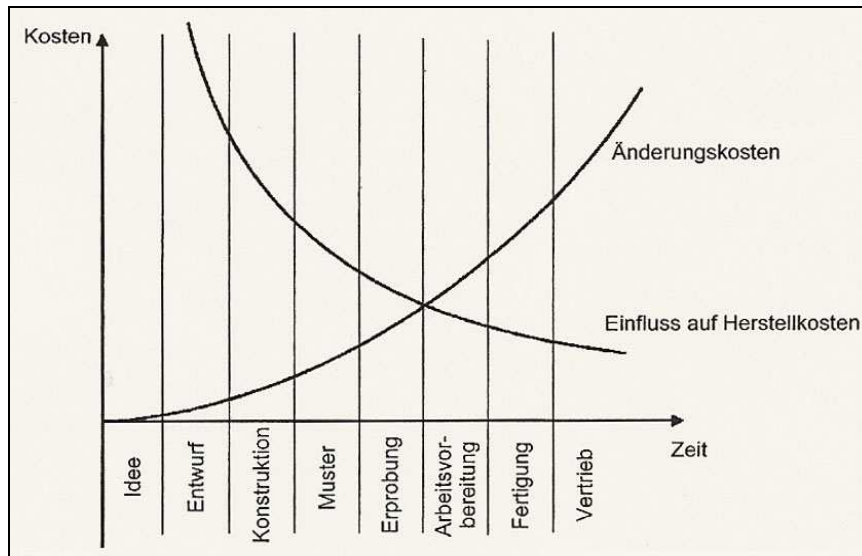


Abb. 61: Entwicklung der Änderungskosten eines Produkts im betrieblichen Durchlauf sowie Einfluss der Produktionsbereiche auf die Herstellungskosten [38]

Die Änderungskosten erhöhen sich in exponentieller Funktion mit dem fortlaufenden Produktionszyklus, während die Einflussmöglichkeiten auf die nachfolgenden Produktionsbereiche stark abnehmen. Die Bedeutsamkeit einer frühzeitigen und vorausschauenden Planung, Konstruktion, und Dokumentation wird hierbei besonders deutlich.

Die Anwendung von Konstruktionsregeln erlaubt im Konstruktions- und Planungsprozess eine systematisierte Vorgehensweise hinsichtlich Funktion, Kosten, und Sicherheit. Auf die Gestaltung des Bauteils wird frühzeitig Einfluss genommen, eine effiziente Maschinennutzung ermöglicht und die Prozesskette durch Reduzierung der Arbeitsschritte verkürzt. Der gesamte Produktionsprozess wird dadurch erleichtert und läuft kontrolliert ab [38].

## 17 Anwendungsbeispiele

In Anlehnung an typische Fügesituationen im Fahrzeugbau werden im Folgenden die Versuchsschweißungen an einer B-Säule (Laserschweißverbindung) bzw. einer C-Säule (CHF-Schweißverbindung) dokumentiert. Die Ergebnisse belegen nicht nur die prinzipielle Herstellbarkeit, sondern zeigen auch die hohe Qualität der mit beiden Schweißverfahren erzeugten Kontur-Schweißverbindungen (Abb. 62 a, b) Als Grundwerkstoff für die Versuchsdurchführung wurde jeweils der Dualphasenstahl DP800 verwendet. Diese Stahlgüte kommt im industriellen Bereich häufig bei der Herstellung crashrelevanter Bauteile zum Einsatz. Die Bauteile wurden im Stumpfstoß gefügt. Gezeigt wird eine Schweißnaht, die vor dem Umformprozess entstanden ist.

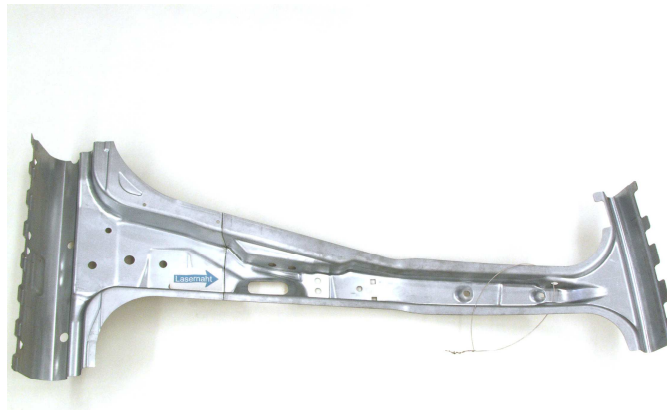
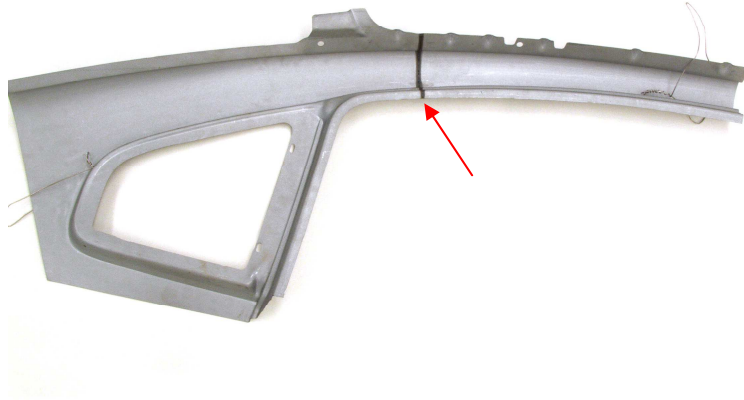


Abb. 62 a: Laserschweißnaht am Beispiel einer B-Säule (ISAF, TU Clausthal)

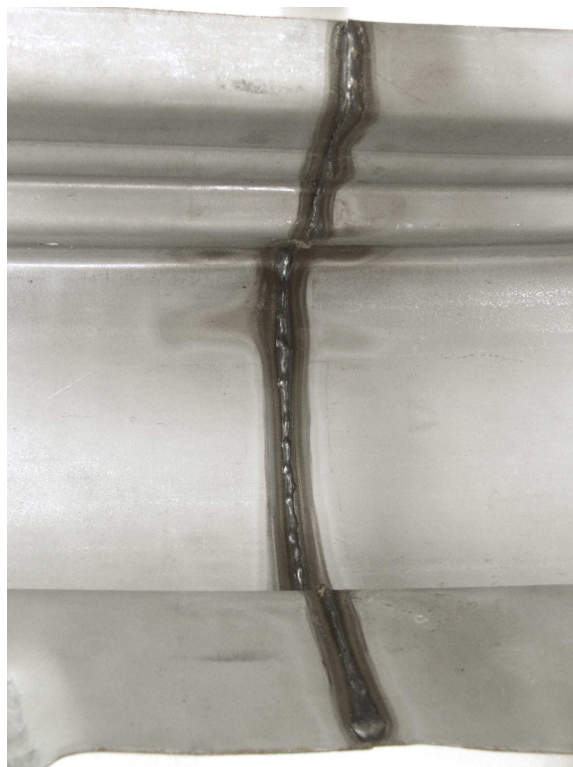


Abb. 62 b): Detailaufnahme B-Säule mit Laserschweißnaht (ISAF, TU Clausthal)

Die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 63 a, b) zeigen eine erfolgreich mit dem konduktiven Hochfrequenzschweißverfahren erzeugte Schweißnaht am Beispiel einer C-Säule. Der Schweißprozess fand nach dem Umformen des Bauteils statt. Es handelt sich um ein inneres Bauteil im nicht sichtbaren Bereich. Der prozessbedingt entstehende Stauchwulst wurde nicht abgearbeitet, da optische Gründe, die diesen zusätzlichen Arbeitsschritt erfordern würden, in diesem Fall nicht relevant sind.



*Abb. 63 a: CHF-Schweißnaht am Beispiel einer C-Säule (ISAF, TU Clausthal)*



*Abb. 63 b): Detailaufnahme C-Säule mit CHF-Schweißnaht (ISAF, TU Clausthal)*

## 18 Bedeutung für die Praxis

Das Hochfrequenzschweißen mit vornehmlich induktiver Energieübertragung ist ein in der Rohrherstellung seit vielen Jahren etabliertes Schweißverfahren und hat sich als kostengünstig, vielseitig und toleranzverträglich erwiesen. Verschiedene Forschungsprojekte haben sich in jüngerer Vergangenheit mit dem Transfer der Hf-Technik auf neue Anwendungsgebiete beschäftigt. Ziel war die Übertragung der prozessspezifischen Vorteile der hohen Schweißgeschwindigkeit, der einfachen Handhabung und der metallurgischen Vorteile beim Schweißen von Rohren auf die Herstellung von Platinen und Konturen. Hierbei konnte eine ausgezeichnete Eignung des Hochfrequenzschweißprozesses, insbesondere auch im Hinblick auf Feinblechwerkstoffe, herausgearbeitet und die bekannten Vorteile um die Möglichkeit metallischer Mischverbindungen erweitert werden [13], [34], [27]. Durch die Kombination von Hochfrequenzschweiß- und Hochfrequenzerwärmungstechnik in einem in-situ-Prozess wird die Verarbeitung lokal verfestigter hochfester metallischer Strukturen ermöglicht und positiv beeinflusst.

Das Hf-Schweißen mit konduktiver Energieeinbringung ist für die Herstellung maßgeschneiderter Blechhalbzeuge ein innovatives und schnelles Fügeverfahren. Bisher wurde die Hochfrequenzschweißtechnik in Bezug auf die Serienfertigung von Blechplatinen jedoch nur vereinzelt industriell eingesetzt. Die Gründe dafür liegenden zum einen in der fehlenden Wissensbasis der spezifischen Prozesskenngrößen und deren Auswirkungen in Bezug auf das Verhalten der Werkstoffe und zum anderen an der mangelnden Motivation, den Weg der etablierten Fügeprozesse zu verlassen und neue Wege von bestehenden klassischen zu modularen, zukunftsrobusten Fabrikstrukturen zu beschreiten. Der Ausschöpfung des Anwendungspotentials der Hf-Technik geht zunächst erheblicher struktureller Neuinvestitionsbedarf in Form von Maschinen, Anlagen und Know-how voran. Jedoch kehrt sich mit dem Hf-Schweißen die klassische Fertigungsprozesskette „Fügen - Umformen“ um. Weil sich die Prozesskette ändert, müssen große Strukturbauteile nicht als ein Bauteil umgeformt werden, sondern das Fügen findet direkt nach dem Umformvorgang im Pressentakt statt. Somit werden die umzuformenden Einzelbauteile, die benötigten Pressen und Werkzeuge kleiner und kostengünstiger [12]. Daraus resultierenden wiederum logistische Vorteile die in die Bewertung der Hf-Technik einfließen und konsequent genutzt werden müssen, um eine vollständige Beurteilung des Potentials dieses Verfahrens zu ermöglichen. Das Hochfrequenzschweißen mit konduktiver Energieeinbringung kann aufgrund seiner hohen Produktivität infolge der hohen Schweißgeschwindigkeit, der hohen Taktrate und des günstigen Energieverbrauchs einen hohen Stellenwert erlangen, sofern die Hf-spezifischen Anforderungen in Konstruktion und Entwicklung weiter verfolgt und umgesetzt werden. [15] [12]. Als nachteilig zu beurteilen ist die verfahrensbedingte Ausprägung einer Stauchwulst an Nahtober- und -unterseite, die u. U. in Umformprozessen zu Schädigungen der Werkzeuge führen kann. Da Nachbearbeitungen (Abschaben des Stauchwulstes) einen zusätzlichen Arbeitsschritt erfordern und das

Risiko der Bildung geometrischer Kerben bergen, die in Umformprozessen zum Versagen der Schweißnaht führen können, ist die Anwendung des Hochfrequenzschweißens für Bauteile im sichtbaren Bereich einer Karosserie weniger geeignet als das Laserstrahlschweißverfahren. Für Teile, die im nicht sichtbaren Einsatzbereich des Fahrzeugbaus verwendet werden, z. B. Unterboden, Tunnel oder Radkasten, erweist sich das Hochfrequenzschweißen jedoch als kostengünstiges, einfaches und schnelles Verfahren, da in diesen Bereichen in der Regel auf eine Nachbearbeitung der Schweißnaht verzichtet werden kann.

Die Laserschweißtechnik hat sich in den letzten Jahren in weiten Bereichen der Industrie durch einfache Automatisierung, hohe Flexibilität und Präzision immer neue Bereiche erschlossen und gilt inzwischen als etablierte Technik. Der energiereiche Lichtstrahl wird mehr und mehr zum unentbehrlichen Werkzeug. Insbesondere die Hybridverfahren erweitern aufgrund der guten Spaltüberbrückbarkeit die Anwendungsmöglichkeiten des Laserschweißens erheblich. Ebenso ergibt sich eine gleichmäßige, schmale Nahtoberfläche, die kaum eine Nacharbeit erfordert. Darüber hinaus unterliegt der Laserprozess durch die berührungslose Technik keinerlei Verschleiß. Nachteilig sind die relativ hohen Investitionskosten für Lasersysteme sowie die gegenüber der Hf-Technik geringeren Schweißgeschwindigkeiten. Weitere Nachteile ergeben sich beim Schweißen hochfester Stahlgüten durch die signifikante Aufhärtung des Schweißnahtbereiches gegenüber dem Grundwerkstoff, die zu einem veränderten Versagensverhalten der Verbindung führt. Die Verwendung eines drahtförmigen Zusatzwerkstoffes mit extrem geringen Kohlenstoffäquivalenten bietet beim MSG-Hybridschweißen die Möglichkeit einer legierungstechnischen Beeinflussung des Schweißgutes und einer Verbesserung der Schweißnahteigenschaften in Abhängigkeit des verwendeten Werkstoffes. Eine Erweiterung der Verfahrensgrenzen kann durch die Kombination des Laserstrahlschweißens mit der prozessintegrierten induktiven Wärmebehandlung erzielt werden. Diese Maßnahme erlaubt die Beeinflussung der Wärmeeinflusszone und kann zur Verbesserung bis zur Optimierung der Verbindungseigenschaften führen [28].

Derzeit bestimmend für den industriellen Einsatz der Laserschweißtechnik sind die sehr guten Verbindungseigenschaften sowie die technologischen Vorteile gegenüber alternativer Fügeverfahren. Die hohen Investitionskosten rechtfertigen jedoch die Prüfung der Einsatzfähigkeit weiterer, insbesondere auf bestimmte Fügesituationen zugeschnittene, kostengünstigere Schweißverfahren.



## 19 Zusammenfassung und Ausblick

Um in der Blech verarbeitenden Industrie den Bedürfnissen der Zukunft besser entsprechen zu können, ist es notwendig, etablierte Fügeprozesse weiter zu optimieren bzw. bedarfsorientiert anzupassen, so dass eine Preisstabilität gewährleistet bleiben kann. In der Automobil- und Zuliefererindustrie setzt man daher vermehrt auf den Einsatz maßgeschneiderter Produkte aus höherfesten und hochfesten Stählen verschiedener Dicken und Güten sowie innovativen Leichtbauwerkstoffen. Hierzu gehören insbesondere Tailored Blanks.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Prozessabläufe von zwei Schweißverfahren vorgestellt, die sich in Bezug auf die Herstellung von Tailored Blanks in besonderer Weise eignen und einer vergleichenden Darstellung in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht unterzogen. Gewählt wurde das Hochfrequenzschweißverfahren mit induktiver Energieübertragung aus der Gruppe der Pressschweißverfahren und das Laserstrahlschweißverfahren aus der Gruppe der Schmelzschweißverfahren. Als bestimmende Faktoren für die Anforderungen an den Schweißprozess fanden die notwendige Vorarbeit, zulässige Toleranzen, erzeugbare Geometrien, die Schweißgeschwindigkeiten, Verzug und Korrosionsschutz sowie das Nacharbeiten des fertigen Bauteils Berücksichtigung. Mit der Durchführung eigener Schweißversuche von Mischverbindungen aus den Stahlgüten DC05 und DP600 wurden die spezifischen Eigenschaften beider Schweißverfahren untersucht und bewertet. Eine kurze Kostenanalyse gängiger, in der Industrie verwendeter Anlagen, die Kapital- und Betriebskosten beinhaltet, ermöglichte einen Vergleich unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Es konnte gezeigt werden, dass beide Verfahren als zukunftsweisende Fügeprozesse auch für die Herstellung von Mischverbindungen geeignet sind, wobei es im speziellen Fall von Aluminium-Stahl-Verbindungen im Falle des Laserstrahlschweißens noch Forschungsbedarf gibt. Die prozessspezifischen Vorteile liegen vor allem in der hohen Qualität der erzeugten Verbindungen. Weitere wichtige Kriterien, wie Prozesszeit und Nacharbeit der Nahtgeometrie führen zu einer geometrieabhängigen Selektion des jeweiligen Schweißverfahrens und sind somit anwendungsfall- bzw. bauteilabhängig.

Trotz zahlreicher theoretischer und praktischer Untersuchungen zum Fügen von hochfesten Stahlwerkstoffen zu Tailored Blanks besteht hinsichtlich der Anwendung des induktiven Hochfrequenzschweißens wie auch des Laserstrahlschweißens noch erhebliche Unsicherheit über die optimale Vorgehensweise zum Fügen der üblicherweise mehrphasigen Feinblechstähle. Bei weitem nicht alle Lösungen, die unter Versuchsbedingungen in Laboren erarbeitet und beherrscht wurden, sind in der industriellen Serienfertigung umsetzbar, da die Forderungen nach Prozessstabilität, hoher Qualität und wirtschaftlicher Effizienz nicht in ausreichendem Maße in Einklang gebracht werden können.

Die in dieser Arbeit bereitgestellten Ergebnisse und Erkenntnisse verbessern die Ausgangssituation des Anwenders und können unmittelbar in der praktischen Schweißtechnik genutzt werden. Ergänzt durch Kostenbeispiele aktueller verfügbarer Schweißanlagen ergibt sich eine hilfreiche Aussage über wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten und erleichtert dem Anwender die Wahl des geeigneten Schweißverfahrens.

Tailored Blanks sind heute ein wichtiger und etablierter Bestandteil im Karosserieleichtbau. Um die Marktbedürfnisse der Zukunft abzudecken, wird die Platinenindustrie Verfahren benötigen, die sehr kurze Prozesszeiten und geringere Kosten bei der Herstellung von Tailored Blanks ermöglichen. Darüber hinaus führt die zunehmende Verwendung von höherfesten und höchstfesten Stahlwerkstoffen zur Auseinandersetzung mit alternativen und neuen Füge-technologien und immer wieder zur Optimierung und Flexibilisierung bestehender Prozesse. Im Rahmen von Werkstoffweiterentwicklungen sind auf dem Markt innovative Stahlprodukte erhältlich, die aufgrund ausgeklügelter Legierungseinstellungen sowie Wärmebehandlungs- und Umformverfahren genau eingestellte Mikrostrukturen aufweisen, die für die gewünschten Eigenschaften sorgen. Dies sind sehr häufig thermodynamisch meta-stabile Zustände, die sich bei Zufuhr ausreichender Aktivierungsenergie unter Verlust der eingestellten Eigenschaften umwandeln. Diese Werkstoffe müssen im Produktionsprozess ohne Verlust ihrer spezifischen Eigenschaften gefügt werden können [52]. Hier kommt es auf die Wahl des geeigneten Fügeverfahrens an.

Ein kontinuierlicher Entwicklungsprozess hat dazu geführt, dass immer wieder neue Produktideen und Verfahren erforscht und umgesetzt werden.

Eine Weiterentwicklung von Tailored Blanks sind z. B. Tailored Tubes, Rohre mit unterschiedlicher Materialstärke. Mit solchen Rohren werden vollkommen neue Karosseriekonstruktionen denkbar. Die Entwickler hoffen auf Gewichtseinsparungen von bis zu 30%. Stahl erreichte so Gewichtsklassen, die sonst nur mit alternativen, allerdings teureren Werkstoffen zu realisieren wären. Um die Rohre in komplexe Formen zu bringen, wendet man ein Innenhochdruckverfahren, das sog. Hydroforming, an. Eine Negativform (geschlossenes Werkzeug) umschließt das rohrförmige Werkstück. Mittels Einleitung eines flüssigen Wirkmediums wird ein Innendruck von bis zu 3000bar erzeugt, wobei das Werkstück die Form der Werkzeuggravur annimmt. Gleichzeitig wird es durch Einleitung einer Axialkraft über zwei Dichtstempel an den Rohrenden gestaucht. Durch Zusammenwirken von Innendruck, Axialkraft und Werkstückgeometrie bildet sich der Umformprozess. Auf diese Weise werden Hohlkörper mit komplexer Außengeometrie und besonderen Festigkeitseigenschaften hergestellt [58]. Tailored Tubes ersetzen z. B. die im Fahrzeugbau in Schalenbauweise hergestellten Bauteile und werden für Träger- oder Rahmenstrukturteile eingesetzt. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit ist die Herstellung von konischen Tailored Tubes. Die Abmessungen dieses Halbzeuges sind den Endkonturen des fertigen Bauteiles bereits sehr ähnlich. Auf diese Weise lassen sich Bauteile mit unterschiedlich wechselnden Profilquerschnitten exakt auf den Belastungsfall angepasst realisieren. Dadurch wird das Leichtbaupotential von Stahl weiter ausgeschöpft.

Neben der technischen Machbarkeit bestimmt für den Anwender stets die Kosten- und Zeitersparnis als Voraussetzung maßgeblich die Qualifizierung neuer Füge-technologien und

ihren nachhaltigen Einsatz. Eine effiziente Produktion wird durch hohes Tempo, Einsparung von Fertigungsschritten, Verkürzung von Umrüstzeiten, Optimierung des Materialbedarfs und Vermeidung bzw. Verringerung von Ausschuss erreicht.

Eine besondere Herausforderung wird darin bestehen, kleinen und mittleren Betrieben und Zulieferern der Automobilindustrie, bei welchen nicht die große Losgröße und die Auslastung der Schweißanlagen, sondern vielmehr eine hohe Flexibilität und standortnahe Produktion in geringen Stückzahlen an erster Stelle steht, geeignete Fügetechnologien zur Verfügung zu stellen, die eine unter dieser Prämisse wirtschaftliche Fertigung und Qualitätssicherung erlaubt. Der Trend zu maßgeschneiderten Blechhalbzeugen unterschiedlichster Geometrien erfordert daher geeignete Fabrikstrukturen und modulare Anlagentechnik. Daher wird es von besonderer Bedeutung sein, nicht nur moderne Anlagentechnik zu entwickeln, sondern insbesondere die grundsätzlichen Kenntnisse der Prozesstechniken zu erweitern und Fertigungsverfahren an die durch die Werkstoffe gegebenen, besonderen Bedingungen anzupassen. Anwender sind in die Lage zu versetzen, den Wechsel von Werkstoffen und Fertigungsverfahren rasch und kostenoptimiert zu bewältigen.

Die prozessspezifischen Vorteile der beiden untersuchten Verfahren liegen vor allem in der hohen Qualität der erzeugten Verbindungen. Weitere wichtige Kriterien, wie Prozesszeit und Nacharbeit der Nahtgeometrie, führen zu einer geometrieabhängigen Selektion des jeweiligen Schweißverfahrens und sind damit anwendungsfall- bzw. bauteilabhängig.

## 20 Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
<b>(1) Marktentwicklung der Tailored Tailored Blanks in Europa</b>	7
<i>Thyssen Krupp Firmenschrift „techforum“ Ausgabe Dez. 2003, Seite 29</i>	
<b>(2) Schema der Stromverteilung eines mit Wechselstrom durchflossenen elektrischen Leiters</b>	10
<i>Rekersdrees Tim, Dissertation TU Clausthal 2006, Untersuchungen zum konduktiven Hochfrequenzschweißen für die Herstellung von Platinen, Seite 9</i>	
<b>(3) Veränderung des wirksamen Leiterquerschnitts bei steigender Frequenz</b>	10
<i>nach Wright, J., Optimizing Efficiency in HF Tube Welding Processes, Tube and Pipe Technology, Nov./Dez. 1999</i>	
<b>(4) Stromdichtverteilung bei einem a) und zwei Leitern b)</b>	10
<i>nach Wright, J., Optimizing Efficiency in HF Tube Welding Processes, Tube and Pipe Technology, Nov./Dez. 1999</i>	
<b>(5) Schema konduktives Hochfrequenzschweißen von Platinen</b>	11
<i>U. Draugelates, B. Bouaifi, A. Schram, J. Bartzsch, B. Ouaisa, C. Fritzsche und S. Daniel, Optimierung der Fügetechnologie für das Fertigen in Feinblech, 1. Industriekolloquium SFB 362 „Fertigen in Feinblech“, 10. u. 11.12.1998 Universität Clausthal-Zellerfeld</i>	
<b>(6) Die geometrischen Prozessparameter Ausspannlänge und Spaltbreite</b>	13
<i>V. Wesling, A. Esderts, A. Schram, T. Rekersdrees, R. Wagener, Clausthal, „Schwingfestigkeitsverhalten von hochfrequenzgeschweißten Aluminiumknetlegierungen“, Schweißen und Schneiden 58 (2006), Heft 8, S. 408-411</i>	
<b>(7) Prinzipskizzen hochfrequenzschweißbarer Bauteile</b>	14
<i>Schwetje, Thorsten, Dissertation TU Clausthal 2002, Untersuchungen zum Hochfrequenzschweißen von Konturbauteilen</i>	
<b>(8) Nahtausbildung einer Hf-Schweißung im 3-Zonen-Modell</b>	17
<i>Modelldarstellung</i>	

	<b>Seite</b>
<b>(9) Kompakter Aufbau des CO<sub>2</sub>-Lasers [Trumpf]</b> <i>„Funktion und Aufbau der TLF-Laser“, Technische Information, Laserbearbeitung, Dokumentation der Firma Trumpf GmbH &amp; Co. KG, Ditzingen, Ausgabe 02/2007</i>	20
<b>(10) Darstellung eines CO<sub>2</sub>-Slap-Lasers der Firma Rofin-Sinar</b> <i>Firmenprospekt Rofin-Sinar, DC-Serie, 2007</i>	21
<b>(11) Schematische Darstellung eines blitzlampengepumpten ND:YAG-Lasers</b> <i>Firmenprospekt der Firma bedea Lasertechnik Berkenhoff &amp; Drebes, Asslar, „Glasfaser-Laserstrahlführungssystem für Festkörperlaser“</i>	22
<b>(12) Darstellung eines diodengepumpten Scheibenlasers</b> <i>Firmenprospekt Rofin-Sinar, DC-Serie, 2007</i>	23
<b>(13) Schweißkopf [Trumpf]</b> <i>„TLF-Laser in der Materialbearbeitung“, Kapitel 2, Technische Information, Laserbearbeitung, Dokumentation der Firma Trumpf GmbH &amp; Co. KG, Ditzingen, Ausgabe 10/2000</i>	24
<b>(14a) Wärmeleitungsschweißen</b>	24
<b>(14b) Tiefschweißen</b> <i>LZH, 4 13649-32 Om, Dissertation Oliver Meier, Laserstrahlschweißen hochfester Stahlfeinbleche mit prozessintegrierter induktiver Wärmebehandlung, 10.08.2005</i>	25
<b>(15) Schematische Darstellung Hybridschweißverfahren</b>	28
<b>(16a) Schliffbild einer Laser-MSG-Schweißnaht,</b> <i>Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mecklenburg-Vorpommern GmbH, Teilprojekt 12.1: „Festkörperlasergestütztes Fügen mit Sensor-Aktorgeführtem Hybridschweißkopf“, Schlussbericht FKZ BMBF: 03 I 0721 A</i>	29

	<b>Seite</b>
<b>(16b) Schliffbild einer Laser-MSG-Schweißnaht,</b> <i>Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mecklenburg-Vorpommern GmbH, "Mobile Laseranwendungen im Schiffbau – von der Vision zur Realisierung, DVS-Berichte, Band 240 (ISBN-13: 978-3-87155-699-9, Schweißen und Schneiden 2006</i>	29
<b>(17) Wärmebehandlung von Stahlwerkstoffen in Verbindung mit dem Schweißen</b> <i>Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser-Verlag, ISBN-10:3-446-40568-2 „Schweißtechnik“, Klaus-Jürgen Matthes, Erhardt Richter (Hrsg.), Seite 47</i>	34
<b>(18a) Schematische Zeit-Temperaturverläufe unterschiedlicher Vorwärmre-</b> <b>(18b) gimes</b> <i>Dr. H. Stiele, EFD Induction GmbH, Freiburg i.B., Prof. Dr. Brenner, Fraunhofer IWS, Dresden, Internetveröffentlichung „Induktiv unterstützte Laser-Materialbearbeitung“ <a href="http://www.efd.at/de/laser_und_induktion_LIW_LIC.pdf">www.efd.at/de/laser_und_induktion_LIW_LIC.pdf</a></i>	35
<b>[19] Schema einer Laser-Induktions-Hybridanlage</b> <i>Dr. H. Stiele, EFD Induction GmbH, Freiburg i.B., Prof. Dr. Brenner, Fraunhofer IWS, Dresden, Internetveröffentlichung „Induktiv unterstützte Laser-Materialbearbeitung“ <a href="http://www.efd.at/de/laser_und_induktion_LIW_LIC.pdf">www.efd.at/de/laser_und_induktion_LIW_LIC.pdf</a></i>	36
<b>(20) Segmentierter Induktor im Modell mit Laserbearbeitungskopf</b> <i>(Gemeinsame Forschungsprojekt der DFG und des LZH) Pressemitteilung Michael Botts, Laser-Zentrum Hannover „Leichtere Automobile durch Laserstrahlschweißen“ vom 28.09.2006</i>	37
<b>Abbildungen in Kapitel 6: Allgemeine Schweißbarkeit von Stählen</b> <i>Normbezeichnung von Stählen und Stahlguss, Normung nach DIN EN, Präsentation des IWS der TU Graz, <a href="http://www.iws.tugraz.at">www.iws.tugraz.at</a>,</i>	38
<b>(21) Normbezeichnung für einen unlegierten Stahl</b>	38
<b>(22) Normbezeichnung für einen niedrig legierten Stahl</b>	39
<b>(23) Normbezeichnung für einen hoch legierten Stahl</b>	40

	<b>Seite</b>
<b>(24) Werkstoffbesonderheiten bestimmter Stahlgruppen im Hinblick auf das Schweißen</b> <i>Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser-Verlag, ISBN-10:3-446-40568-2 „Schweißtechnik“, Klaus-Jürgen Matthes, Erhardt Richter (Hrsg.), Seite 29</i>	40
<b>(25) Schweiß-ZTU-Diagramm eines Modellwerkstoffes</b> <i>Seyffarth, P., Meyer, B., Scharff, A.: Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 110, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1992</i>	42
<b>(26) STAZ-Schaubild zur Ermittlung von <math>t_{8/5}</math> und Gefüge</b> <i>Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik Aachen, Lehrmaterial Umdruck, ISF Aachen, 4. „Schweißen un- und niedrig legierter Stähle“, Seite 60, Internet- veröffentlichung <a href="http://www.isf-aachen.de/lehre/material/umdrucke">www.isf-aachen.de/lehre/material/umdrucke</a></i>	44
<b>(27) Werkstoffe im Automobilbau</b> <i>Werkstoffe im Automobilbau – Anforderungen und Trends, BMW Group, Bay- ern Innovative, Cluster-Management Dr. Rudolf Stauber, Präsentation Cluster „Neue Werkstoffe in Bayern“, 26.10.2006, Seite 10</i>	46
<b>(28) Eigenschaftsprofil verschiedener Stähle für die Anwendung im Automobilbau,</b> <i>nach: Arcelor, Salzgitter, ThyssenKrupp, Meier, O., „Laserschweißen hochfester Stahlfeibleche mit prozessintegrierter induktiver Wärmebehandlung“, Dissertation, Universität Hannover, 2005 Seite 10</i>	48
<b>(29) Steuerung der Werkstoffeigenschaften warm- und kalt gewalzter Produkte</b> <i>T. Heller, O. Hoffmann, U. Etzold, K.-P. Imlau, ThyssenKrupp Stahl AG, D- 47161 Duisburg, „Neue Stähle für moderne Fahrzeugkarosserien“, Internetver- öffentlichung: <a href="http://www.dgm.de">www.dgm.de</a></i>	49
<b>Gleichungen</b>	
1) Gleichung zur Berechnung des Kohlenstoffäquivalentes	41
2 - 4) Gleichungen zur Berechnung der spezifischen Stauchkraft	85

	<b>Seite</b>
<b>(30) EMUS-Prüfkopf in einer Laserschweißanlage für Tailored Blanks</b>	52
<b>(31) Prinzip Prüfung der Laserschweißnähte</b>	53
<b>(32) Anzeige eines Flankenbindefehlers in einer Laserschweißnaht</b>	53
<b>[33] Dispersionsdiagramm der a) Lamb-Wellen, b) SH-Plattenwellen</b>	54
<p><i>Hans-Jürgen Salzburger, Gerhard Hübschen, Fraunhofer Institut zerstörungs- freie Prüfverfahren, Universität Geb. 37, 66123 Saarbrücken, DGZfP- Jahrestagung 2003, „Fehlerprüfung und Schabungskontrolle von Stumpf- schweißnähten an Feinblechen und dünnwandigen Rohren. Erprobte Ultra- schalltechniken mittels SH-Plattenwellen und EMUS-Prüfköpfen, <a href="http://www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/v12/v12.htm">www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/v12/v12.htm</a></i></p>	
<b>(34) Funktionsprinzip der Electronic-Speckle-Pattern-Interferometrie</b>	56
<p><i>Ettemeyer, A., Schubach, H.-R., Anwendungen der Laser-Speckle- Interferometrie in der Materialprüfung, Konferenz-Einzelbericht: Werkstoffprü- fung 1997 für Sicherheit, Bau Nauheim, D, 4. – 5. Dezember, Seite 101-106 (1997)</i></p>	
<b>(35) Schematische Abbildung eines Tiefungsversuchs nach Erichsen</b>	60
<p><i>DIN 50101</i></p>	
<b>(36) Einsatzmöglichkeiten von Tailored Blanks im Automobilbau</b>	64
<p><i>ThyssenKrupp Tailored Blanks GmbH, Firmenprospekt, Tailored Blanks, Opti- mierte Bauteile aus Stahlblech, Ausgabe Juli 2003</i></p>	
<b>(37) Auswahlkriterien des Schweißprozesses</b>	67
<p><i>Christian Haferkorn, 2007</i></p>	
<b>(38) Analyse und Kohlenstoffäquivalent der untersuchten Werkstoffe</b>	68
<p><i>Christian Haferkorn, 2007, Bestandteilanalyse Versuchswerkstoffe</i></p>	
<b>(39) Schweißbare Werkstoffe</b>	72
<p><i>ThyssenKrupp Steel, Kaiser-Wilhelm-Str. 100, 47166 Duisburg</i></p>	
<b>(40) Laserschweißanlage Nd:YAG Festkörperlaser,</b>	81
<p><i>Foto: LZH, Hollerithallee, Hannover</i></p>	



	<b>Seite</b>
<b>(41) Versuchsvorbereitung des Laserschweißprozesses</b>	81
<i>Christian Haferkorn, 2007, Foto Versuchsschweißung, LZH, Hannover</i>	
<b>(42) Verbindung nach erfolgtem Laserschweißversuch</b>	82
<i>Christian Haferkorn, 2007, Foto Versuchsschweißung, LZH, Hannover</i>	
<b>(43) Hochfrequenzschweißanlage zum induktiven Schweißen</b>	83
<i>Foto: ISAF, Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren TU Clausthal, Agricolastraße 2, 38678 Clausthal-Zellerfeld</i>	
<b>(44) Positionierung der Versuchswerkstücke in der CHFW-Anlage</b>	84
<i>Christian Haferkorn, 2007, Foto Versuchsschweißung, ISAF TU Clausthal</i>	
<b>(45) CHF-Schweißprozess</b>	85
<i>Christian Haferkorn, 2007, Foto Versuchsschweißung, ISAF TU Clausthal</i>	
<b>(46) CHFW-Verbindung nach erfolgtem Schweißversuch</b>	86
<i>Christian Haferkorn, 2007, Foto Versuchsschweißung, ISAF TU Clausthal</i>	
<b>(47) Übersicht einer CHF-geschweißten Naht</b>	87
<i>Christian Haferkorn, 2007, lichtmikroskopische Aufnahme, Versuchsschweißung, ISAF TU Clausthal</i>	
<b>(48) Fügelinie in der Mitte der CHF-geschweißten Naht</b>	88
<i>Christian Haferkorn, 2007, REM-Aufnahme, Versuchsschweißung, ISAF TU Clausthal</i>	
<b>(49) Übersicht einer laserstrahlgeschweißten Naht</b>	88
<i>Christian Haferkorn, 2007, lichtmikroskopische Aufnahme, Versuchsschweißung, LZH, Hannover</i>	
<b>(50) Schweißnahtmitte bei einer laserstrahlgeschweißten Probe</b>	89
<i>Christian Haferkorn, 2007, REM-Aufnahme, Versuchsschweißung, LZH, Hannover</i>	

	<b>Seite</b>
<b>(51) Härteverlauf in einer lasergeschweißten Probe</b>	90
<i>Christian Haferkorn, 2007, Härtemessung und REM-Aufnahmen, Versuchsschweißung, LZH, Hannover</i>	
<b>(52) Härteverlauf in einer CHF-geschweißten Probe</b>	91
<i>Christian Haferkorn, 2007, Härtemessung und REM-Aufnahmen, Versuchsschweißung, ISAF TU Clausthal</i>	
<b>(53) Versagensverhalten einer laserstrahlgeschweißten Probe (53a1 u. 53 a2) und einer CHF-geschweißten Probe (53 b1 u. 53 b2))</b>	92
<i>Christian Haferkorn, 2007, Fotos Laser- und CHF- Versuchsschweißungen</i>	
<b>(54) Probengeometrie für Querkzugversuche</b>	93
<b>(55) Spannungs-Dehnungsverläufe einer laserstrahlgeschweißten Probe (gelb) und einer CHF-geschweißten Probe (blau)</b>	93
<i>Christian Haferkorn, 2007, Diagramme Versuchsschweißung</i>	
<b>(56a) a) Laserschweißnaht</b>	94
<b>(56b) b) CHF-Schweißnaht</b>	
<i>Christian Haferkorn, 2007, Fotos Laser- und CHF-Versuchsschweißungen</i>	
<b>(57) Grafik feste Kosten der Schweißanlagen</b>	97
<i>Christian Haferkorn, 2007</i>	
<b>(58) Grafik variable Kosten der Schweißanlagen</b>	98
<i>Christian Haferkorn, 2007</i>	
<b>(59) Grafik feste u. variable Kosten der Schweißanlagen</b>	98
<i>Christian Haferkorn, 2007</i>	
<b>(60) Quellen der Verschwendung im Produktionszyklus</b>	100
<i>Bilddatenbank der Firma Trumpf &amp; Co. KG, Ditzingen, <a href="http://www.trumpf.com">www.trumpf.com</a></i>	

	<b>Seite</b>
<b>(61) <i>Entwicklung der Änderungskosten im betrieblichen Durchlauf sowie Einfluss der Produktionsbereiche auf die Herstellungskosten</i></b>	101
<i>Schwetje, Thorsten, Dissertation TU Clausthal, Untersuchungen zum Hochfrequenzschweißen von Konturbauteilen, Seite 30</i>	
<b>(62a) <i>Laserschweißnaht am Beispiel einer B-Säule</i></b>	102
<b>(62b) <i>Detailaufnahme B-Säule mit Laserschweißnaht</i></b>	
<i>Fotos: ISAF, Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren TU Clausthal, Agricolastraße 2, 38678 Clausthal-Zellerfeld</i>	
<b>(63a) <i>CHF-Schweißnaht am Beispiel einer C-Säule</i></b>	103
<b>(63b) <i>Detailaufnahme C-Säule mit CHF-Schweißnaht</i></b>	
<i>Fotos: ISAF, Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren TU Clausthal, Agricolastraße 2, 38678 Clausthal-Zellerfeld</i>	

## 21 Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle</b>	<b>Seite</b>
<b>(Tab. 1) <i>Höchstgrenzen der Begleit- oder Legierungselemente unlegierter Stähle</i></b> <i>Normbezeichnung von Stählen und Stahlguss, Normung nach DIN EN, Präsentation des IWS der TU Graz, <a href="http://www.iws.tugraz.at">www.iws.tugraz.at</a>,</i>	38
<b>(Tab. 2) <i>Legierungselemente</i></b> <i>Normbezeichnung von Stählen und Stahlguss, Normung nach DIN EN, Präsentation des IWS der TU Graz, <a href="http://www.iws.tugraz.at">www.iws.tugraz.at</a></i>	39
<b>(Tab. 3) <i>Einteilung der Laserstrahlquellen in verschiedene Gefahrenklassen</i></b> <i>Gebhardt, A. Prof. Dr.-Ing., Fachhochschule Aachen, Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik, Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Rapid Prototyping, Lasertechnologie, Fach-Nr.: 441/442, Skript zur Vorlesung</i>	77
<b>(Tab. 4) <i>Sicherheitsmaßnahmen für Laserschweißanlagen</i></b> <i>Gebhardt, A. Prof. Dr.-Ing., Fachhochschule Aachen, Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik, Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Rapid Prototyping, Lasertechnologie, Fach-Nr.: 441/442, Skript zur Vorlesung</i>	78
<b>(Tab. 5) <i>Mechanisch-technologische Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe</i></b>	79
<b>(Tab. 6) <i>Kohlenstoffäquivalent der untersuchten Werkstoffe</i></b>	79
<b>(Tab. 7) <i>Analyse der chemischen Zusammensetzung der Probe des DC05</i></b>	80
<b>(Tab. 8) <i>Analyse der chemischen Zusammensetzung der Probe des DP600</i></b>	80
<b>(Tab. 9) <i>Technische Daten der Laserschweißanlage</i></b> <i>LZH, Hollerithallee, Hannover</i>	81
<b>(Tab. 10) <i>Technische Daten der CHF-Schweißanlage</i></b> <i>ISAF, TU Clausthal</i>	83

<b>Tabelle</b>	<b>Seite</b>
<b>(Tab. 11) Kostenberechnung Yb:YAG-Festkörperlaser-Anlage</b> <i>Christian Haferkorn, 2007</i>	96
<b>(Tab. 12) Kostenberechnung Yd:YAG-Festkörperlaser-Anlage</b> <i>Christian Haferkorn, 2007</i>	97
<b>(Tab. 13) Kostenberechnung CO<sub>2</sub>-Slab-Laser-Anlage</b> <i>Christian Haferkorn, 2007</i>	97
<b>(Tab. 14) Kostenberechnung CHF-Schweißanlage</b> <i>Christian Haferkorn, 2007</i>	98
<b>(Tab. 15) Maschinenstundensätze der zum Vergleich stehenden Schweißanlagen</b> <i>Christian Haferkorn, 2007</i>	100

## 22 Literaturverzeichnis

- [1] *Bach, Fr.-W., Haferkamp, H., Bunte, J., Cordini P. u. Bormann, A., Verbessertes Umformverhalten durch serielle induktive Nachwärmung von Laserstrahlschweißnähten. Materialwissenschaften und Werkstofftechnik Vol. 33 (2002) Nr. 7, Seite 411*
- [2] *Bargel, H.J., Schulze, G.: Werkstoffkunde, ISBN 3540401148*
- [3] *Bedeo Lasertechnik, Berkenhoff & Drebbes GmbH, Firmenschrift „Glasfaser-Laserstrahlführungssystem für Festkörperlaser“, Seite 2*
- [4] *Beitz, W., Küttner, K.-H., Dubbel -Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Auflage, 1995, Springer Verlag; Berlin*
- [5] *[www.bias.de](http://www.bias.de) , Lasermaterialbearbeitung: Fügen und Oberflächenbehandlung, Hybrid-schweißen, Seite 7*
- [6] *Botts, Michael, Pressemitteilung, „Leichtere Automobile durch Laserstrahlschweißen“ LZH, Internetveröffentlichung [www.lzh.de](http://www.lzh.de), Seite 1*
- [7] *Brandl, W. Prof. Dr.-Ing., FH Gelsenkirchen, Versuchsunterlagen für den Versuch 4: Technologische Werkstoffprüfung, Härteprüfung, Rasterelektronenmikroskopie, Praktikumsunterlagen, Seite 2 und 3, Internetveröffentlichung: [www.fh-gelsenkirchen.de/werkstoffkunde/Deutsch/Lehrveranstaltung/Studenten/PRAK-Met-Teil\\_1-Versuch\\_4.pdf](http://www.fh-gelsenkirchen.de/werkstoffkunde/Deutsch/Lehrveranstaltung/Studenten/PRAK-Met-Teil_1-Versuch_4.pdf)*
- [8] *Cloos Schweisstechnik, Homepage, Schweißverfahren, MSG-Laser-Hybrid-Schweißprozess, [www.cloos.de](http://www.cloos.de)*
- [9] *Dilthey, U.: „7. Internationales Aachener Schweißtechnik Kolloquium, 03.-04.05.2001, Hochleistungsfügeverfahren, Grundlagen, Anwendungen Ausrüstungen, Band I, Seite 493*
- [10] *Doege, E., Behrens, B.-A.: Handbuch der Umformtechnik, ISBN 3540234411*
- [11] *Domke, W. „Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung“, Giradet Verlag 1977, 7. Auflage, ISBN: 3773612176*

- [12] Draugelates, U., Schram, A. et al.: „Hochfrequenzschweißen beflügelt Trends in der Blechverarbeitung“, VDI-Z; Integrierte Produktion; Springer VDI Verlag, Heft 1 / 2-2002[12], Seite 53
- [13] e-niro/BDS 2003, Internetartikel [www.e-niro.de](http://www.e-niro.de), Wärmeeinflusszone (WEZ)
- [14] Fahrenwaldt, H.-J., Schuler, V., Praxiswissen Schweißtechnik, 1. Auflage Oktober 2003, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage Dezember 2006, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, ISBN 978-3-87155-970-9, ISBN 978-3-8348-0194-4
- [15] Fritzsche, C., Schmidt, M.: „Hochfrequenzschweißen – Stand und Anwendungen“, Konferezenzelbericht DVS-Berichte, Band 213, 2001, Seite 87-92, DVS-Verlag, Düsseldorf
- [16] Fritzsche, C., „Untersuchungen zum Hochfrequenzschweißen von Feinblechwerkstoffen“, Dissertation TU Clausthal, 2002
- [17] Gebhardt, A. Prof. Dr.-Ing., Fachhochschule Aachen, Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik, Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Rapid Prototyping, Lasertechnologie, Fach-Nr.: 441/442, Skript zur Vorlesung
- [18] Grupp, M., IPG-Laser GmbH, Burbach, Bericht „Laser-Anwenderforum, Bremen, 13./14.09.2006
- [19] Iksoo, Kim, „Einfluß des Spannungszustandes während des hydraulischen Tiefungsversuchs auf das Umformverhalten von Blechwerkstoffen“, Dissertation, TU Aachen, 17.09.2002
- [20] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (ISER), Düsseldorf, Merkblatt 823, „Schweißen von Edelstahl Rostfrei“, Seite 16, [www.edelstahl-rostfrei.de](http://www.edelstahl-rostfrei.de)
- [21] Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik Aachen, Schlussbericht für den Zeitraum vom 01.03.04 bis 28.02.06, „Qualifizierung und Nutzung der Hybrid-Synergieeffekte zum Hochleistungsschweißen von Leichtmetallwerkstoffen“, 13.06.2006
- [22] Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik Aachen, Lehrmaterial Umdruck, ISF Aachen, 4. „Schweißen un- und niedrig legierter Stähle“, Seite 60, Internetveröffentlichung [www.isf-aachen.de/lehre/material/umdrucke](http://www.isf-aachen.de/lehre/material/umdrucke)

- [23] IWS der TU Graz, Normbezeichnung von Stählen und Stahlguss, Normung nach DIN EN, Präsentation des IWS der TU Graz, [www.iws.tugraz.at](http://www.iws.tugraz.at), Seite 1 - 3
- [24] [www.konstruktion-online.de/kon2/kon/iw-news.php](http://www.konstruktion-online.de/kon2/kon/iw-news.php), 22.05.2006 „Wirtschaftlicher, genauer, schneller: Schweißen von Tailored Blanks, Internetveröffentlichung aus Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieurwerkstoffe, Springer VDI-Verlag
- [25] Matthes, Klaus-Jürgen, Richter Erhardt, (Hrsg.) „Schweißtechnik“, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser-Verlag, ISBN-10:3-446-40568-2, 3. Auflage, 2006
- [26] Mazac, K., Schmidt, M., „Hochfrequenzschweißen mit konduktiver Energieeinbringung“, 2. Industriekolloquium SFB 362 „Fertigen in Feinblech“, Clausthal-Zellerfeld, März 2000
- [27] Mazac, K.: „Hochfrequenzschweißen verkürzt Fügezeiten beim Herstellen von Tailored Blanks und Profilen“, Maschinenmarkt, Band 105, Heft 38, 1999, Seite 44
- [28] Meier, O., „Laserschweißen hochfester Stahlfleinbleche mit prozessintegrierter induktiver Wärmebehandlung“, Dissertation, Universität Hannover, 2005
- [29] Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Fachzeitschrift „Faszination Forschung“, Max Planck Forschung 3/2004, Artikel „Ausgekochter Stahl für das Auto von morgen“, Seite 38 - 41
- [30] Pasquale, Pablo, „Numerische Simulation schweißtechnischer Fertigungsschritte“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 13.02.2001
- [31] Rekersdrees, T., „Untersuchungen zum konduktiven Hochfrequenzschweißen für die Herstellung von Platinen, Dissertation TU Clausthal, 2006
- [32] Rofin-Sinar, Firmenschrift, DC-Serie
- [33] Rofin-Sinar, Firmenschrift, DS-Serie
- [34] Rofin-Sinar, Internetpräsenz, [www.rofin.com/deutsch/anwendungen/laser-makro-macro/laser-schweissen/stahl.php](http://www.rofin.com/deutsch/anwendungen/laser-makro-macro/laser-schweissen/stahl.php), Presseinformation „Die Qualität im Fokus“



- [35] Salzburger, H.-J., Hübschen G., Fraunhofer Institut zerstörungsfreie Prüfverfahren, Universität Saarbrücken, „Fehlerprüfung und Schabungskontrolle von Stumpfschweißnähten an Feinblechen und dünnwandigen Rohren, Erprobte Ultraschalltechniken mittels SH-Plattenwellen und EMUS-Prüfköpfen
- [36] Schießl, P., Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München, Vorlesungsskript I. „Schweißen von Stahl“, Mai 2003, Seite 15 und 16
- [37] Schikorr, W., Vorlesungsskript „Fertigungstechnik I“, Abschnitt 3, Umformen, FH Stralsund, Internetveröffentlichung [www.fh-stralsund.de](http://www.fh-stralsund.de)
- [38] Schwetje, T., „Untersuchungen zum Hochfrequenzschweißen von Konturbauteilen“, Dissertation TU Clausthal, 2002
- [39] Schwetje, T., Mazac, K., „Hochfrequenzschweißen eröffnet Zulieferern Chancen“, Blech in Form, Band 4, 2002
- [40] Stahl-Informationen-Zentrum „Stahlfeinbleche mit schweißgeeignetem Korrosionsschutzprimer für den Einsatz in der Automobilindustrie, Merkblatt 122, Seite 3, Ausgabe 2004, ISSN 0175-2006, [www.stahl-info.de](http://www.stahl-info.de))
- [41] Stiele, Dr. H., EFD Induction GmbH, Freiburg i. B., Brenner, Prof., Fraunhofer IWS, Dresden, Internetveröffentlichung: Induktiv unterstützte Laser-Materialbearbeitung, [www.efd.at/de/Laser\\_und\\_Induktion\\_LIW\\_LIC.pdf](http://www.efd.at/de/Laser_und_Induktion_LIW_LIC.pdf)
- [42] ThyssenKrupp, Werkstofftechnik, Firmenschrift: Innovate!, Seite 47
- [43] ThyssenKrupp, Fachpressemitteilung vom 09.09.2003 „Weiteres Wachstum bei ThyssenKrupp Tailored Blanks“ [www.thyssenkrupp.com/de/presse/art\\_detail.html&eid=tk\\_pnid938](http://www.thyssenkrupp.com/de/presse/art_detail.html&eid=tk_pnid938)
- [44] Thyssen Krupp techforum, Firmenschrift, Dez. 2003, Kapitel 10, Seite 11 – 13, Zink-Magnesium-Oberflächenveredelung für verbesserten Korrosionsschutz
- [45] Trumpf GmbH & Co. KG, Ditzingen, Faszination Blech, Kapitel 7, Blech mit Blech verbinden, Auswahl des Verfahrens, ISBN-10 3-8343-3051-5)

- [46] *Trumpf GmbH & Co. KG, Ditzingen ,Funktion und Aufbau der TLF-Laser“, Kapitel 1, Technische Information, Laserbearbeitung, Dokumentation, Ausgabe 10/2000*
- [47] *Trumpf GmbH & Co. KG, Ditzingen, Technische Information, Laserbearbeitung, Dokumentation, Ausgabe 10/2000 „Grundlagen, Aufbau und Einsatz“, Kapitel 2-28*
- [48] *Trumpf GmbH & Co. KG, Ditzingen, Technische Information, Laserbearbeitung, Dokumentation, Ausgabe 10/2000 „Laser in der Materialverarbeitung“*
- [49] *Trumpf GmbH & Co. KG, Ditzingen, Technische Information, Laserbearbeitung, CO2-Laser, Kapitel 5, Verfahren, Dokumentation, Ausgabe 02/2007*
- [50] *Trumpf GmbH & Co. KG, Ditzingen, Auszug aus dem Buch „Faszination Blech“, ISBN 3-88649-17-0, 1996, Seite 127, Stähle*
- [51] *Viehweger, B., Simon S., Wagner, L., Berg, A., 2002 Aluminium-Stahl-Verbundblech. In: Entwicklungen im Karosseriebau – Development in Chassis Engineering: Tagung Hamburg 7./8. Mai/Hrsg.: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, 2002, 377 – 384, ISBN 3-18-091674-5, (VDI-Berichte; 1674)*
- [52] *Weddige, H.-J., M.Eng. (oxon.), „Stahl im Wettbewerb der Werkstoffe“, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Seite 103*
- [53] *Wesling, V., Prof. Dr.-Ing., Vorlesungsskript Schweißtechnik I, WS 2002/2003, Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren der Technischen Universität Clausthal, Seite 63/64) 2) Schweißtechnik, Seite 390*
- [54] *Wesling, V., Forschungsprogramm, Teilprojekt B5, SFB 675, TU Clausthal, „Schweißtechnische Verarbeitung lokal verfestigter Werkstoffe zur Herstellung von Knoten und Strukturen“*
- [55] *Wesling, V., Forschungsprogramm, Teilprojekt A3, SFB 362, TU Clausthal, „Bestimmung der qualitätsrelevanten Werkstoff- und Prozesskenngrößen für das kombinierte Umformen und Fügen von Feinblech“*
- [56] *WIPO (world intellectual property organization), Internetveröffentlichung WO/2006/120222) „Method and Device for the thermal Joining of materials with high melting oxide coated surfaces“ [www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp](http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp)*

- [57]** *Wikipedia, Enzyklopädie, Kategorie "Umformen" Internetveröffentlichung*  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Innenhochdruckumformen>
- [58]** *Wright, J.: Optimizing Efficiency in Hf Tube Welding Processes", Tube and Pipe Technology. Nov./Dez. 1999*

## LEBENS LAUF

Name: Christian Haferkorn

Wohnort: Warmbüchenstraße 16  
30175 Hannover  
Tel.: 0172/5106008

Geburtsdatum: 16. Oktober 1959  
deutsche Staatsangehörigkeit, ledig

Geburtsort: Hannover

Eltern: Vater: Dr.-Ing. Gotthard Haferkorn, WP, † 2002  
Mutter: Margrit Haferkorn, Hausfrau

Geschwister: zwei Schwestern

Schulbildung: Grundschule 1965 - 1969  
Gymnasium: 1969 - 1978  
Abitur 1978

Studium: Universität Hannover 1979 - 1984  
Fachrichtung: Wirtschaftswissenschaften  
Abschluss: Diplom-Ökonom

Beruf: Steuerberaterexamen: 1989  
Wirtschaftsprüferexamen: 1991

Berufstätigkeit: Attesta Treuhandgesellschaft mbH  
Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, Hannover  
1984 - 2001  
  
BDO Deutsche Warentreuhand AG  
Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, Hannover  
seit 2001

Promotionsstudium: Technische Universität Clausthal 2001 - 2007  
Fachrichtung: Maschinenbau